



BGE TECHNOLOGY GmbH

## **CHRISTA-II**

# **Quantifizierung von Integritätskriterien für Sicherheitsbewertungen an Kristallinstandorten in Deutschland**

**BGE TEC 2021-14**



## CHRISTA-II

# Quantifizierung von Integritätskriterien für Sicherheitsbewertungen an Kristallinstandorten in Deutschland

BGE TEC 2021-14

Autoren	Michael Jobmann Jobst Maßmann Artur Meleshyn Christian Müller Jan Thiedau	
Datum	15.09.2021	
Auftraggeber	BMWi	Vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, KIT
Förderkennzeichen	02E11617A/B	

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes  
*"Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA-II)".*

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von der BGE TECHNOLOGY GmbH in Zusammenarbeit mit BGR und GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**

Karlsruher Institut für Technologie

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>2</b>
2.1	Einlagerungsoptionen .....	2
2.2	Sicherheitsanforderungen.....	3
2.3	Kriterien zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.....	4
<b>3</b>	<b>Quantifizierung der Kriterien für die Option „multipler ewG“ .....</b>	<b>6</b>
3.1	Modellvorstellung.....	6
3.2	Dilatanz-Kriterium .....	7
3.2.1	Bruchverhalten.....	7
3.2.2	Bruchverhalten und Kluftorientierung .....	10
3.2.3	Bruchverhalten und Permeabilität .....	10
3.2.4	Bruchverhalten bei zeitabhängiger Schwächung der Festigkeit.....	11
3.2.5	Das GSI-System .....	14
3.2.6	Anwendung des GSI für das Dilatanz-Kriterium .....	16
3.2.7	Definition und Quantifizierung des Kriteriums.....	18
3.3	Fluiddruck-Kriterium.....	19
3.3.1	Bestimmung der zu erwartenden Fluiddrücke .....	19
3.3.2	Fluiddruckbelastbarkeit und Zunahme von Fluidwegsamkeiten.....	20
3.3.3	Ansatz der effektiven Spannungen.....	21
3.3.4	Definition und Quantifizierung des Kriteriums.....	22
3.4	Temperatur-Kriterium.....	23
3.4.1	Definition und Quantifizierung des Kriteriums.....	23
3.4.2	Diskussion thermisch bedingter Einwirkungen .....	24
3.4.2.1	Hydraulische Eigenschaften.....	24
3.4.2.1.1	Permeabilität .....	24
3.4.2.1.2	Kluftweite .....	29
3.4.2.2	Mechanische Eigenschaften .....	31
3.4.2.2.1	Schwellwerte für Mikro- und Makrorissentstehung .....	31
3.4.2.2.2	Druckfestigkeit .....	32
3.4.2.2.3	Zugfestigkeit .....	34
3.4.2.2.4	E-Modul .....	34
3.4.2.3	Thermische Eigenschaften.....	35
3.4.2.4	Chemische Aspekte .....	36
3.4.2.4.1	Sorption .....	36
3.4.2.4.2	Thermochemische Sulfatreduktion .....	37
3.4.2.5	Mineralogische Aspekte .....	38
3.4.2.5.1	Hydrothermale Alterationsprozesse für Kristallingestein-bildende Minerale.....	38
3.4.2.5.2	Alterationsprozesse für Kluft-füllende Minerale .....	41
3.4.2.6	Mikrobiologische Aspekte .....	41
3.4.3	Bewertung der thermisch bedingten Effekte.....	44
3.4.4	Einschätzung zur Grenztemperatur für die Option multipler ewG .....	46
3.5	Bewertung eines chemischen Einflusses .....	46
<b>4</b>	<b>Quantifizierung der Kriterien für die Option „überlagernder ewG“ .....</b>	<b>51</b>
4.1	Salzformation als überlagernder ewG .....	51
4.1.1	Dilatanz-Kriterium .....	52
4.1.2	Fluiddruck-Kriterium.....	53
4.1.3	Temperatur-Kriterium .....	54
4.1.3.1	Thermisch induzierte Prozesse .....	55

---

4.2	Tonformation als überlagernder ewG .....	56
4.2.1	Dilatanz-Kriterium .....	56
4.2.2	Fluiddruck-Kriterium .....	57
4.2.3	Temperatur-Kriterium .....	58
4.2.3.1	Thermisch induzierte Prozesse .....	59
4.2.3.2	Einschätzung zur Grenztemperatur für die Option überlagernder ewG (Ton) .....	59
<b>5</b>	<b>Quantifizierung der Kriterien für die Option „modifiziertes KBS-3 Konzept“ .....</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>62</b>

**ANHANG**

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes CHRISTA-II (*Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland*) soll für Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Kristallin aufgezeigt werden, auf welcher Basis und in welcher Form eine Prüfung der Integrität sowohl der geologischen als auch der (geo) technischen Barriere geführt werden kann. Wichtige Stützen für eine Sicherheitsbewertung sind sowohl Labor- und In-situ-Messungen zur Erkundung bzw. zur Ermittlung gesteinspezifischer Eigenschaften als auch Modellberechnungen auf Basis bekannter und abgesicherter Stoffmodelle und der dafür notwendigen Parameter. Ausgangspunkt für die Integritätsbewertung ist die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) zur Endlagerung wärmeentwickelnder hoch-radioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020). Die in diesem Zusammenhang relevanten Passagen der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung mit Bezug zur Integritätsprüfung sind im Kapitel 2 dargestellt.

Um die Integritätsprüfung quantitativ durchführen zu können, ist es notwendig, die in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung weitestgehend qualitativ beschriebenen Kriterien soweit zu quantifizieren, dass sie im Rahmen von rechnerisch durchzuführenden Bewertungen abgehandelt werden können. Aus diesem Grund werden in den Kapiteln 3 bis 6 die Integritätskriterien quantitativ formuliert. Diese quantitative Formulierung ist als vorläufig anzusehen, da noch keinerlei Datenmaterial aus Standorterkundungen vorliegt. Bei Vorlage entsprechender Kenntnisse sind diese Formulierungen zu verifizieren und ggf. anzupassen.

## 2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen beschrieben, die für die Quantifizierung der Integritätskriterien herangezogen werden. Um den Bezug der Kriterien zu den erfolgshöufigen Einlagerungsoptionen herzustellen, werden diese im Folgenden kurz skizziert. Darüber hinaus werden die entscheidenden Passagen aus der geltenden Endlagersicherheitsanforderungsverordnung dargestellt und kurz diskutiert.

### 2.1 Einlagerungsoptionen

Im Zuge der Machbarkeitsuntersuchung im Projekt CHRISTA (Jobmann et al. 2016) wurde die Übertragbarkeit des in den Sicherheitsanforderungen verankerten Konzeptes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) in Kristallingestein geprüft. Die Überprüfung erfolgte dergestalt, dass zunächst die Grundlagen für die Formulierung einer Strategie und des konzeptionellen Vorgehens zur Sicherheitsbewertung von Kristallinstandorten untersucht wurden. Dies betrifft die mögliche Ausweisung eines ewG im Kristallin, die Möglichkeit zur Prüfung der Integrität des Wirtsgesteins sowie Berechnungen zur Migration von Radionukliden. Darüber hinaus wurde geprüft, inwieweit bestehende Behälter- bzw. Einlagerungs- und Barrierenkonzepte auf deutsche Verhältnisse übertragbar wären.

Im Projekt CHRISTA wurde das Ergebnis erarbeitet, dass sich das rein auf (geo)technischen Barrieren beruhende skandinavische KBS-3-Konzept (SKB 2010) nur mit leichten Änderungen auf Deutschland übertragen lässt (Jobmann et al. 2016). Da in Schweden keine der stark wärmeentwickelnden MOX-Brennelemente einzulagern sind, muss zum einen das Behälter- und Beladungskonzept angepasst werden. Mit Blick auf den längeren Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren (nicht 100 000 Jahre wie in Schweden) und des andersartigen Bewertungskonzeptes für die geotechnischen Barrieren, wäre zum anderen das Konzept für die Einlagerungsbohrungen durch Einführung von Widerlagern zu ergänzen. Diese Option wird unter der Bezeichnung „modifiziertes KBS-3-Konzept“ geführt.

Unter Anwendung des ewG-Konzeptes ergeben sich Optionen, bei denen das kristalline Wirtsgestein entweder selbst einen oder mehrere ewG enthält oder wo der ewG durch überlagernde Gesteine dargestellt wird. Es lassen sich also insgesamt drei Typen unterscheiden:

- Typ "**multipler ewG**": Hierbei werden mehrere kleinere ewG-Zellen ausgewiesen, die in kristallinen Gesteinsblöcken mit ausschließlich hydraulisch unwirksamen Klüften oder gar ungeklüfteten Bereichen positioniert werden (Abb. 2.1 mitte). Die Einschlussfunktion wird durch Versatz und Streckenverschlüsse ergänzt.
- Typ "**überlagernder ewG**": Hierbei wird die Einschlussfunktion durch überlagernde Gesteine mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit (z.B. Salze, Tone) und den Schacht- oder Rampenverschlüssen gewährleistet (Abb. 2.1 rechts).
- Typ "**modifiziertes KBS-3-Konzept**": Hierbei übernimmt nicht das Gestein die Einschlussfunktion, sondern die Behälter, wobei diese noch durch einen sie umgebenden Buffer unterstützt werden (Abb. 2.1 links).

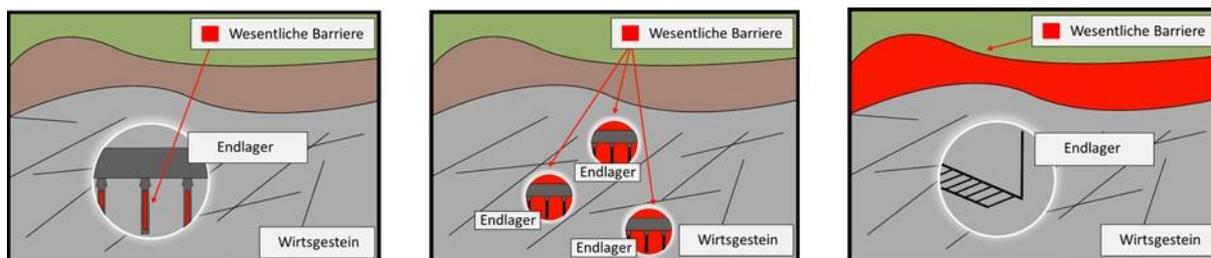


Abb. 2.1: Optionen zur Einlagerung im Kristallingestein

Basierend auf den so identifizierten ewG-Typen oder den notwendigen Modifikationen am skandinavischen KBS-3-Konzept wurden im Rahmen des Forschungsprojektes KONEKD (Bertrams et al. 2017) für alle drei Konzepttypen technische Endlagerkonzepte entwickelt, die als Ausgangspunkte für die Entwicklung einer Sicherheitsstrategie dienen. Die beschriebenen Einlagerungsoptionen unterscheiden sich zwar nicht hinsichtlich des Wirtsgesteins, das in allen drei Fällen durch kristallines Gestein gebildet wird, wohl aber in den wesentlichen Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht (EndlSiAnfV 2020).

Beim „multiplen ewG“ beinhaltet das Wirtsgestein gleichzeitig den oder die ewG. Beim „überlagernden ewG“ beinhalten die Gesteine, die das kristalline Wirtsgestein überlagern, den ewG. Bei diesen handelt es sich vorzugsweise um Salz- oder Tongesteine. Bei diesen beiden Konzepten stellen der bzw. die ewG die wesentliche Barriere dar. Bei dem „modifizierten KBS-3 Konzept“ wird dem Behälter die Einschlussfunktion als wesentliche Barriere zugeschrieben. Die Abfälle werden zwar in dem Wirtsgestein Kristallin eingelagert, aber weder vom Kristallin noch von anderen umgebenden Gesteinen wird hinsichtlich der Einschlussfunktion Kredit genommen. Diese Unterschiedlichkeit spiegelt sich auch in den Integritätskriterien bzw. in deren Quantifizierung wider.

Im Hinblick auf die praktische Umsetzbarkeit der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung wird in dem vorliegenden Bericht eine Ableitung bzw. Konkretisierung der Kriterien dergestalt angegeben, dass eine rechnerische Prüfung im Rahmen des konzeptionellen Vorgehens zur Sicherheitsbewertung erfolgen kann.

## 2.2 Sicherheitsanforderungen

In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung ist die Ausweisung eines ewG streng mit der Prüfung seiner Integrität verknüpft. Der Begriff Integrität ist in der Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wie folgt definiert (EndlSiAnfV 2020):

Der Begriff „Integrität“ beschreibt den Erhalt der für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften der Barrieren des Endlagersystems.

Kriterien für die Prüfung der Integrität des ewG sind in §5 der Verordnung unabhängig vom Barrieregestein folgendermaßen angegeben:

### §5 Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentlicher Barriere

- (1) Im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1 ist für die zu erwartenden Entwicklungen im Bewertungszeitraum die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu prüfen und darzustellen und seine Robustheit zu begründen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist unter Berücksichtigung der zu erwartenden Entwicklungen räumlich

eindeutig zu definieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren mindestens in dem Zeitraum erhalten bleiben, in dem diese Barrieren nach dem Sicherheitskonzept erforderlich sind.

- (2) Hinsichtlich der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist zu prüfen und darzustellen, dass
1. die Ausbildung von Fluidwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten von erheblichen Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen führen können, innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist; dafür dürfen
    - a) die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der auffahrungsbedingten Auflockerungszonen auf Grund von zu erwartenden Beanspruchungen nicht überschritten werden und
    - b) die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer erheblichen Zunahme von Fluidwegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt,
  2. durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird und
  3. die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nicht erheblich beeinträchtigen.
- (3) Bei der Prüfung und Darstellung sind sämtliche im Endlagerbereich aufzufahrenden oder bereits bestehenden Hohlräume und die zu ihrer Abdichtung und ihrem Verschluss vorgesehenen technischen und geotechnischen Barrieren zu berücksichtigen.
- (4) Die für die Langzeitsicherheit erforderlichen Eigenschaften von technischen oder geotechnischen Barrieren sind im Sicherheitskonzept zu spezifizieren. Es ist zu prüfen und darzustellen, dass die Herstellung und Errichtung der Barrieren nach diesen Spezifikationen in der erforderlichen Anzahl qualitätsgesichert möglich sind. Die vorgesehene Qualitätssicherung muss dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Herstellung, die Errichtung und die Funktion der Barrieren müssen erfolgreich erprobt sein, soweit ihre Robustheit nicht anderweitig nachgewiesen werden kann und keine Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben.

### **2.3 Kriterien zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs**

Grundsätzlich wird es für die Integritätsprüfung als notwendig erachtet, numerische, zeitlich und örtlich aufgelöste Berechnungen durchzuführen, die die wesentlichen Prozesse und deren Kopplung im Endlagersystem abbilden.

In einem ersten Schritt hin zu einer rechnerischen Prüfung werden basierend auf den oben zitierten Anforderungen (EndlSiAnfV 2020) zur Prüfung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) Kriterien benannt. Grundsätzlich müssen alle Kriterien für einen betrachteten Gebirgsbereich eingehalten werden, damit die Integrität gewährleistet werden kann. Diese Kriterien werden in den folgenden Kapiteln im Einzelnen genauer hinsichtlich einer quantitativen Bewertung diskutiert.

Im §5 (2) werden unter Punkt 1 Fluidwegsamkeiten thematisiert. Als Unterpunkte werden hier die 1a) Dilatanzfestigkeit und 1b) Fluiddruckbelastbarkeit dargestellt. Die entsprechenden Kriterien werden im Folgenden als **Dilatanz-Kriterium** und **Fluiddruck-Kriterium** diskutiert.

Im Hinblick auf die Ausbildung von Fluidwegsamkeiten durch Deformationsprozesse erscheinen diese Kriterien als abdeckend. Insbesondere im Kristallingestein ist die Betrachtung von Diskontinuitäten in Form von Rissen, Klüften und Störungen für die Integrität maßgeblich. Fluidwegsamkeiten können sich im Allgemeinen ausbilden durch:

- die Bildung neuer Risse beim Überschreiten der Gesteinsfestigkeit,
- Risswachstum, beim Überschreiten eines Risswachstumskriteriums oder durch
- Öffnung zuvor verschlossener Risse durch Überschreiten der Rissfestigkeit.

Es wird davon ausgegangen, dass in jedem Fall der Entstehung von Wegsamkeiten ein dilatantes Verhalten vorausgeht und sei es auch nur für einen kurzen Zeitraum. Grundsätzlich sollte dies für die zu erwartende Beanspruchung durch thermomechanische Prozesse ebenso gelten, wie durch Fluiddruck-getriebene Prozesse. Mit der getrennten Betrachtung der Fluiddruckbelastbarkeit wird diesem Mechanismus besondere Bedeutung gegeben.

Nicht abgedeckt durch die alleinige Betrachtung der Dilatanz und Fluiddruckbelastbarkeit ist die Ausbildung von Wegsamkeiten durch physikalische bzw. chemische Lösungsreaktionen, wie sie insbesondere im Kristallingestein in verfüllten Klüften auftreten könnten. Dies müsste durch weitere Untersuchungen ausgeschlossen werden, die im Vorhaben CHRISTA-II nicht durchgeführt werden.

Die in (EndlSiAnfV 2020, §5 (2)) unter dem Punkt 2 dargestellten Anforderung zur Temperaturbelastung wird im Folgenden als **Temperatur-Kriterium** diskutiert.

Unter Punkt 3. werden Anforderungen bezüglich der chemischen Verhältnisse genannt. Diese explizite Anforderung zur Integrität ist im Vergleich zu den älteren Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) neu. Zur Berücksichtigung dieser Anforderung sind zum einen wirtsgesteinsspezifische Analysen durchzuführen, die quantifizieren, was jeweils eine erhebliche Beeinträchtigung darstellt und zum anderen methodische Vorgehensweisen und Maßstäbe zu entwickeln, mit Hilfe derer die Integrität bewertet werden kann. Ein Vorschlag zur Bewertung wird in Kapitel 3.5 gemacht.

### 3 Quantifizierung der Kriterien für die Option „multipler ewG“

Diese Einlagerungsoption ist die einzige Option, bei der das kristalline Wirtsgestein auch das ewG-bildende Gestein darstellt. Im Folgenden werden die Kriterien für die Sicherheitsbewertung getrennt für die geologische Barriere und für das (geo-)technische Barrierensystem angegeben.

#### 3.1 Modellvorstellung

Für das Konzept des „multiplen ewG“ wird davon ausgegangen, dass einzelne Einlagerungsbereiche, ohne Betrachtung von Schächten oder Rampen, vollständig innerhalb einer ewG-Zelle liegen. Bei diesem ewG-Typ umschließt der zu definierende ewG (rote Linie in Abb. 3.1) vollständig einen einzelnen Einlagerungsbereich inklusive der Auflockerungszone (grauer Bereich in Abb. 3.1; Mächtigkeit der ALZ ist durch gestrichelte Linie markiert).

Die ewG-Zellen weisen eine geringe Permeabilität und keine hydraulisch wirksamen Klüfte auf, sodass die Anforderungen des StandAG an die hydraulischen Eigenschaften erfüllt werden; er kann also als wesentliche Barriere zur Rückhaltung von Radionukliden herangezogen werden. Es wird jedoch grundsätzlich davon ausgegangen, dass der ewG nicht vollkommen kluffrei ist (Mrugalla et al. 2020). Es werden kleine Klüfte, die weitestgehend geschlossen sind und damit keinen präferentiellen Fließpfad darstellen, angenommen. Diese tragen entsprechend zur integralen Permeabilität in dem ewG bei und können eine mechanische Schwächung darstellen.

Signifikant hydraulisch wirksame Klüfte definieren die Ränder einzelner ewG-Zellen. Zur Vereinfachung der Integritätsbewertung für diese ggf. schiefwinkligen Gebilde könnte abdeckend die kürzeste Distanz  $d_1$  (vgl. Abb. 3.1 rechts) zur nächstgelegenen hydraulisch wirksamen Kluft ermittelt werden. Diese Distanz würde dann die Mindestausdehnung eines sich daraus ergebenden „regelmäßigen“ ewG, darstellen. Hinsichtlich der (hydraulischen) Einschlusswirksamkeit hängt die notwendige Mindestausdehnung von der Permeabilität, der Porosität und dem vorliegenden hydraulischen Gradienten im Bereich eines ewG ab (AkEnd 2002).

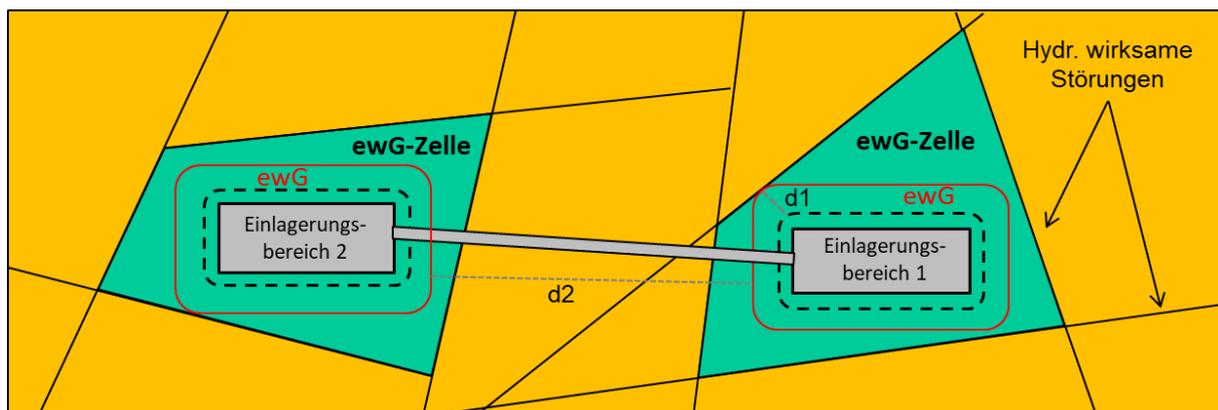


Abb. 3.1: Schematische Darstellung zweier benachbarter ewG-Zellen (ewG-Typ „multipler ewG“)

Bei dem Typ „multipler ewG“ ist es je nach Lage bzw. Anordnung der einzelnen ewG-Zellen nicht ausgeschlossen, dass sich einzelne ewG-Zellen gegenseitig beeinflussen, d. h. Auswirkungen auf den ewG einer benachbarten Zelle haben (vgl. Thiedau et al. 2021). In solchen Fällen wäre beispielsweise zu prüfen, ob es eine Sicherheitsdistanz  $d_2$  gibt (vgl. Abb. 3.1), oberhalb derer eine gegenseitige Beeinflussung als nicht mehr relevant angesehen werden

kann. Ist das der Fall, braucht die Integritätsbewertung nur an einer Zelle stellvertretend für alle, unter abdeckenden Annahmen, durchgeführt zu werden. Das heißt, die Integritätsprüfung wäre dann ggf. nur für eine „repräsentative ewG-Zelle“ (reZ) durchzuführen. Diese Möglichkeit bleibt zu prüfen. Gemäß dieser Modellvorstellung werden im Folgenden die einzelnen Kriterien quantifiziert.

### 3.2 Dilatanz-Kriterium

Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob in einem ewG ein ungeklüfteter Gesteinskörper vorliegt, oder ob eine Vorschädigung in Form von Klüften vorliegt. Bei der Einlagerungsoption „multipler ewG“ wird, wie oben erwähnt, davon ausgegangen, dass kleinere weitestgehend geschlossene Klüfte vorhanden sind (Mrugalla et al. 2020). Diese mineralisierten Klüfte können eine mechanische Schwächung des Gesteinskomplexes darstellen (vgl. Abb. 3.2) und sind somit im Zuge der Integritätsprüfung der geologischen Barriere in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

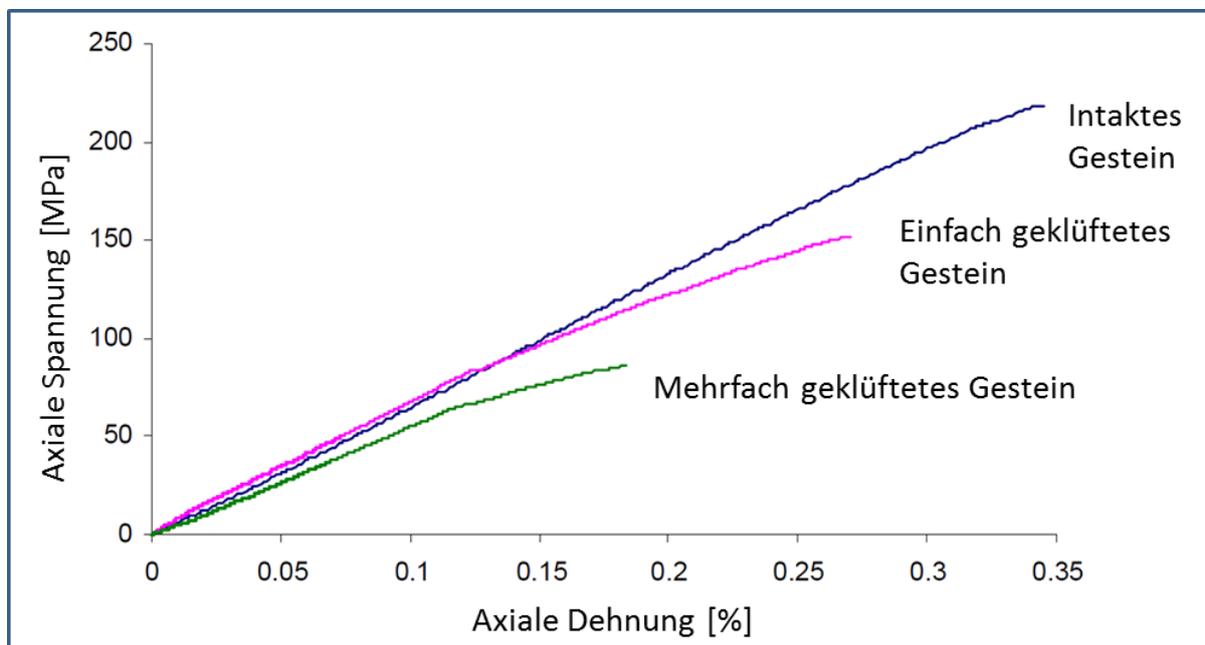


Abb. 3.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener kristalliner Gesteinsproben mit unterschiedlichem Klüftungsgrad (nach Ranjith et al. 2004)

Abb. 3.2 zeigt sehr anschaulich das unterschiedliche Spannungs-Dehnungsverhalten in Abhängigkeit von der Klüftung des Gesteinskörpers. Im Folgenden wird zunächst das Bruchverhalten kristalliner Gesteine diskutiert.

#### 3.2.1 Bruchverhalten

In kristallinen Gesteinen wachsen vorhandene oder entstehen neue Mikrorisse bei langsamer Lasterhöhung. Erreichen diese Mikrorisse eine kritische Größe, so besteht die Möglichkeit, dass sie sich zunehmend vereinen und schließlich ein makroskopischer Riss und damit eine Schädigung entsteht.

Ranjith et al. (2004) haben beispielhaft die Grenzspannungen für den Beginn der Mikrorissentstehung und damit den Beginn des „subkritischen Risswachstums“ sowie für die Entstehung eines makroskopischen Risses und damit Schädigung der Probe anhand von akustischen Emissionsmessungen abgeleitet. In Abb. 3.3 ist für eine mehrfach geklüftete Granitprobe die Summe der akustischen Ereignisse gegenüber der angelegten Spannung aufgetragen. In der Anfangsphase, in der durch den ansteigenden Druck zunächst Mikrorisse geschlossen werden, sind nur wenige bis keine akustischen Ereignisse festzustellen. Das liegt daran, dass das Schließen von Mikrorissen kaum mit Energiefreisetzen verbunden ist. Mit weiter steigender Belastung nimmt die Anzahl der akustischen Ereignisse ab einer bestimmten Spannung linear zu. Dies repräsentiert den Schwellwert für die Entstehung von Mikrorissen, die bei steigender Belastung mit konstanter Geschwindigkeit (stable crack propagation = subkritisches Risswachstum) weiter wachsen.

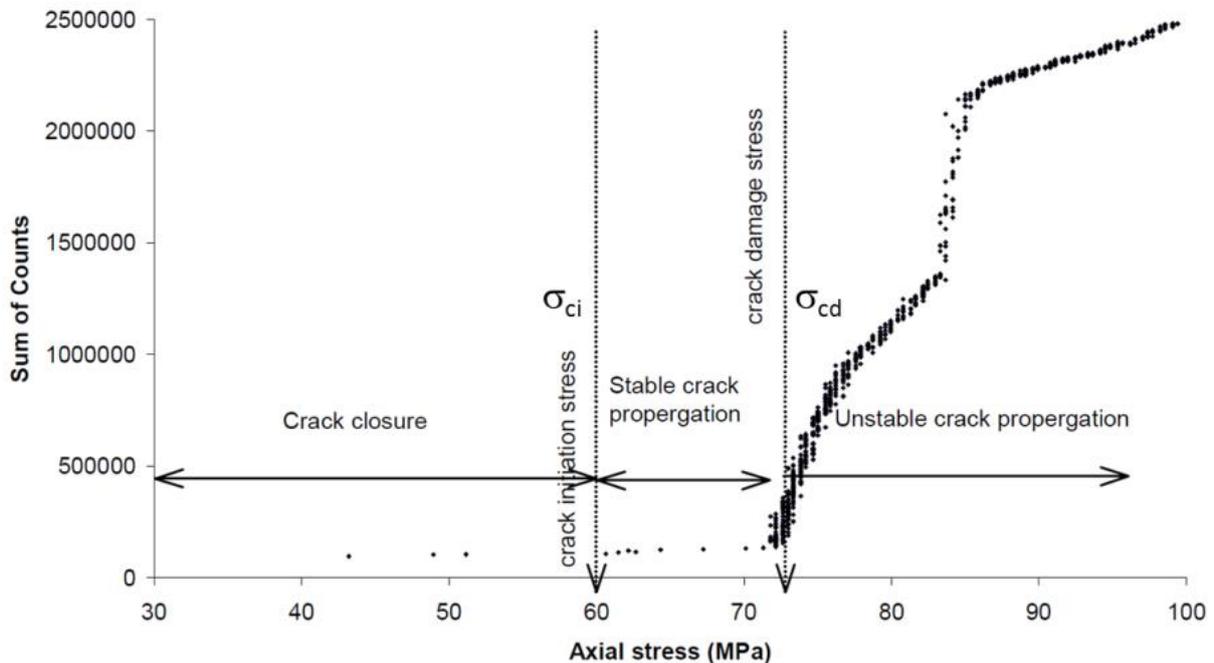


Abb. 3.3: Akustische Emissionsereignisse bei einer mehrfach geklüfteten Granitprobe unter einaxialer Belastung (Ranjith et al. 2004)

Ab einer bestimmten Spannung kommt es dann zu einem drastischen Anstieg der akustischen Ereignisse. Dies ist der Punkt, an dem sich die Mikrorisse nach und nach zu einem makroskopischen Riss vereinen und die Probe anschließend ihre mechanische Stabilität verliert.

In Abb. 3.4 ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter einaxialer Belastung von Proben des Lac du Bonnet Granits dargestellt (Martin 1997). In diesem Diagramm sind auch die Grenzspannungen für die Schließung von Mikrorissen (crack closure), zur Entstehung von Mikrorissen  $\sigma_{ci}$  und zur Entstehung von makroskopischen Rissen  $\sigma_{cd}$  eingezeichnet. Die Werte liegen im Bereich von 40-60 % bzw. 70-90 % der ebenfalls markierten Kurzzeitfestigkeit  $\sigma_p$ . Die Schwellwerte lassen sich anhand der eingezeichneten Ergebnisse von akustischen Emissionsmessungen (AE) klar erkennen.

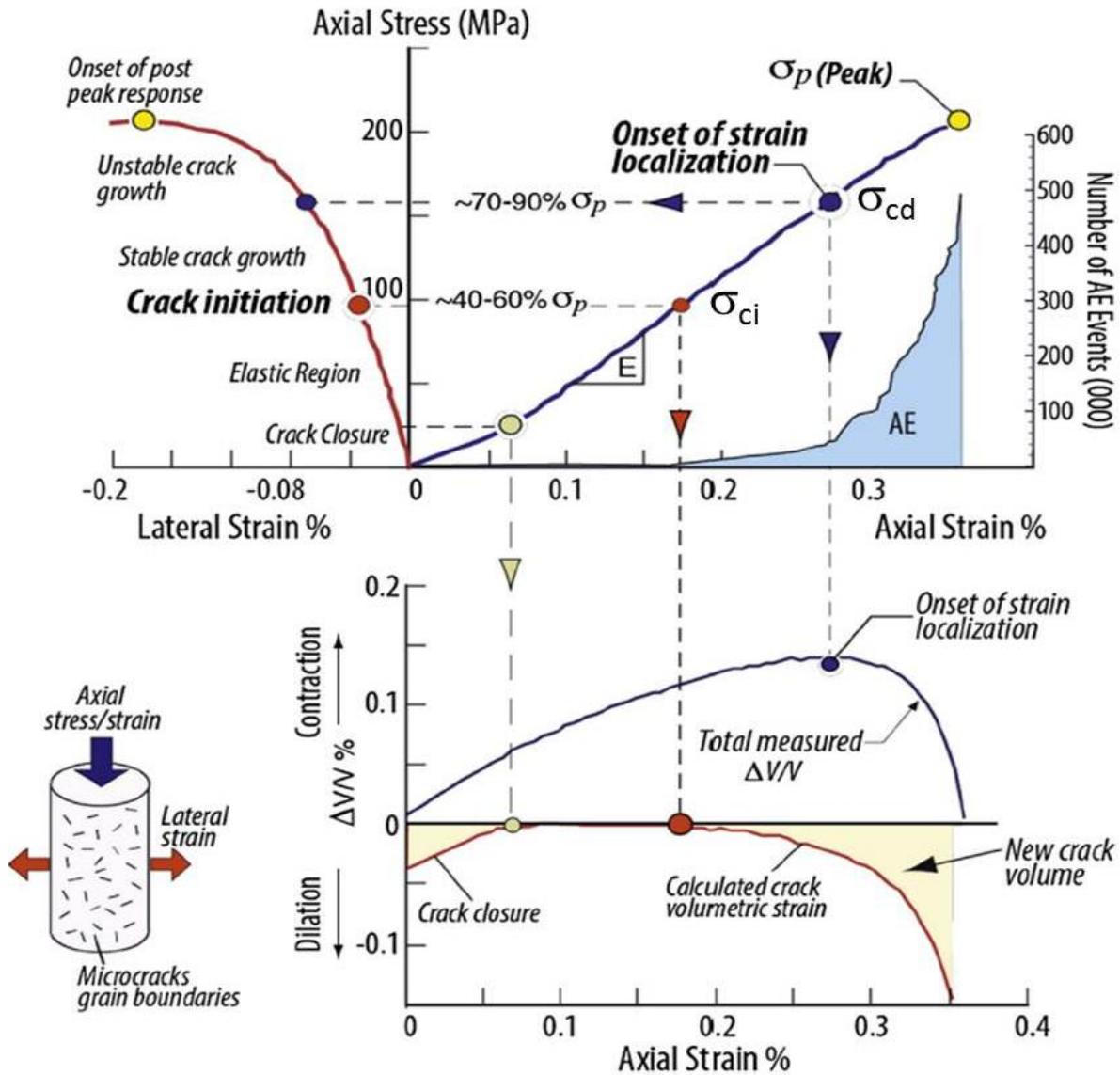


Abb. 3.4: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Proben des Lac du Bonnet Granits in Kanada;  
 $\sigma_{ci}$  = Mikroriss-Initiierungsspannung,  $\sigma_{cd}$  = Schädigungsspannung (Hoek & Martin 2014,  
 Damjanac & Fairhurst 2010, Martin 1997)

Beispielhafte Werte für die unterschiedlichen Schwellwerte sind in Eberhardt et al. (1999) für drei verschiedene kanadische granitoide Gesteine angegeben (Tab. 3.1). Als eine wesentliche Ursache für die Unterschiedlichkeit der Schwellwerte, speziell die der Makroriss-Initiierung, wird in dem Artikel der Unterschied in den Korngrößen aufgeführt. Mit steigender Korngröße reduziert sich der Schwellwert für die Makroriss-Entstehung. Die Ursache wird darin gesehen, dass bei größeren Körnern die Korngrenzen länger sind und somit auch die Schwächezonen, was sich insbesondere dann bemerkbar macht, wenn einzelne Mikrorisse (an Korngrenzen) anfangen miteinander zu reagieren und sich zu vereinen. Durchgehende Makrorisse entstehen bei größeren Körnern also früher.

Tab. 3.1: Schwellwerte für Spannungen bei einaxialer Belastung für drei verschiedene granitoide Gesteine gemittelt über jeweils 5 Messungen (Eberhardt et al. 1999)

Schwellwert für	Granodiorit	Grauer Granit	Pegmatit
Mikroriss-Schließung	45,6	55,6	45,2
Mikroriss-Initiierung	79,6	79,6	72,0
Makroriss-Initiierung	194,0	147,4	113,2

### 3.2.2 Bruchverhalten und Kluftorientierung

Ein weiterer Faktor, der die Festigkeit von kristallinen Gesteinen bei Vorhandensein von Klüften beeinflusst, ist die Orientierung der Klüfte relativ zur angreifenden Kraft. Abb. 3.5 zeigt sowohl Messergebnisse aus Triaxialversuchen an Granitproben als auch Berechnungsergebnisse für Kluftorientierungen im Bereich von 50° bis 85° zur Horizontalen. Aus beiden Kurven lässt sich ein Minimum der Festigkeit ablesen, das bei einem Winkel von etwa 65° durchlaufen wird.

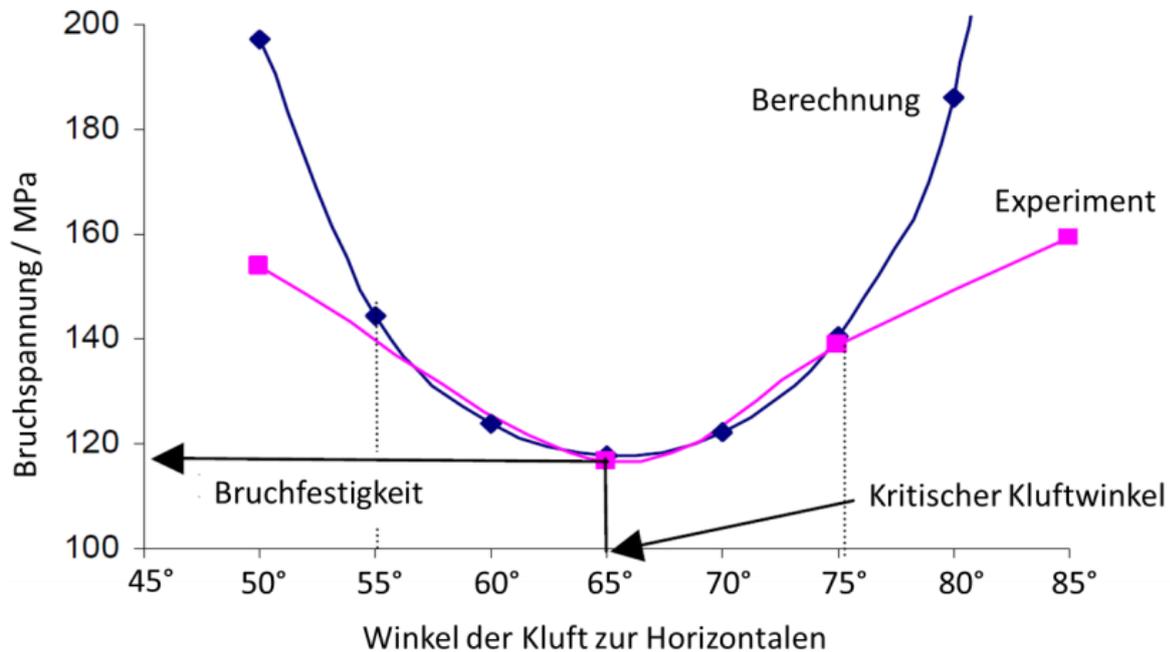


Abb. 3.5: Effekt der Kluftorientierung auf die Festigkeit einer Granitprobe mit einer Kluft (Ranjith et al. 2004)

### 3.2.3 Bruchverhalten und Permeabilität

Das in Abb. 3.4 dargestellte Spannung-Dehnungsverhalten kann, speziell in Zusammenhang mit den darin markierten Schwellwerten für die Mikro- und Makrorissentstehung, in Verbindung mit der Durchlässigkeit des Gesteins gebracht werden. In Tan & Konietzky (2017) und Tan et al. (2015) wurde für Aue-Granitproben aus Deutschland das Spannungs-Dehnungsverhalten beschrieben und gleichzeitig in Verbindung zur gemessenen Permeabilität gesetzt (Abb. 3.6).

Der Ablauf lässt sich prinzipiell in 6 Phasen (I-VI) unterteilen. Ausgehend von Punkt A kommt es in Phase I zu einer signifikanten Reduzierung der Permeabilität, die durch das Schließen von Mikrorissen verursacht wird.

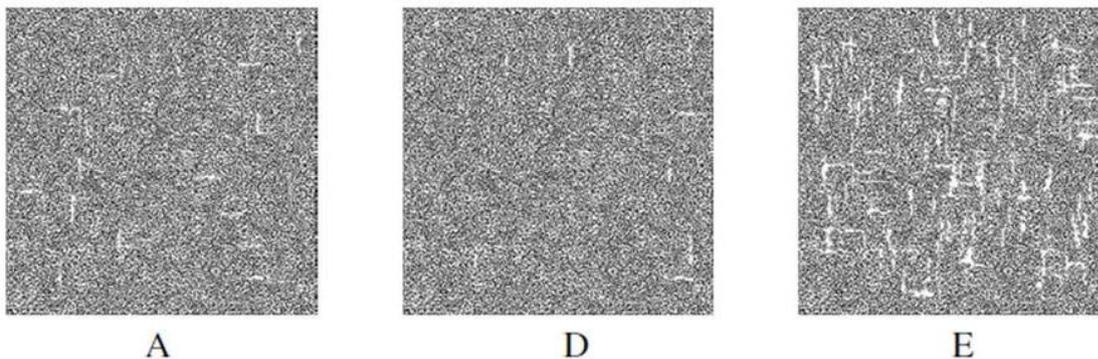
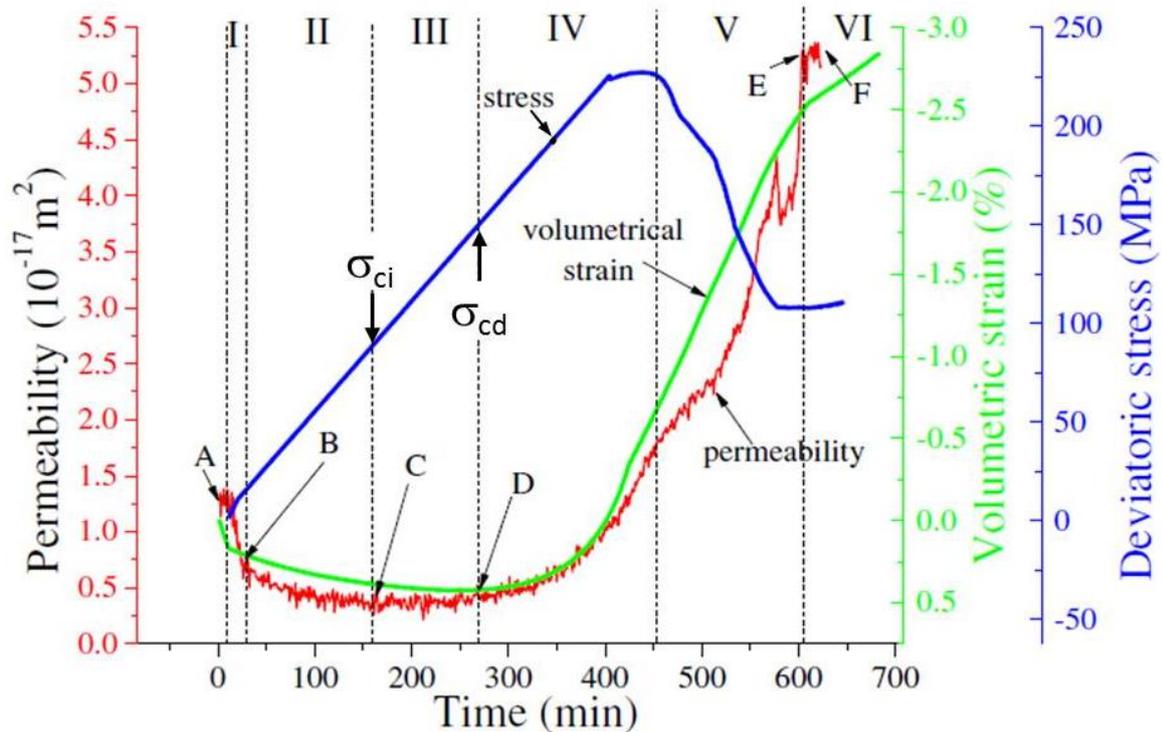


Abb. 3.6: Spannungs-Dehnungskurve für Aue-Granit zusammen mit Abbildungen eines UDEC-Modells des Riss-Systems zu verschiedenen Zeiten (Tan et al. 2015)

Phase 2 ist zwar ebenfalls durch eine Reduzierung der Permeabilität gekennzeichnet, diese ist aber nur noch gering, da ursprüngliche Mikrorisse inzwischen geschlossen sind und nur der darüber hinaus vorhandene (geringe) Porenraum komprimiert wird. In Phase III zwischen den Punkten C und D ist die Permeabilität in etwa konstant. Der Punkt C charakterisiert den Schwellwert zur Mikrorissentstehung  $\sigma_{ci}$  während der Punkt D den Schwellwert  $\sigma_{cd}$  (vgl. Abb. 3.4) widerspiegelt. Mit Überschreiten des Punktes D beginnt in Phase IV eine signifikante Erhöhung der Permeabilität. Diese Phase ist durch das Vereinen und Interagieren von sich ausweitenden Mikrorissen gekennzeichnet. In dieser Phase entstehen makroskopische Risse, die die mechanische Integrität verletzen und letztlich auch die Permeabilität beeinflussen.

### 3.2.4 Bruchverhalten bei zeitabhängiger Schwächung der Festigkeit

Aus der Literatur ist bekannt, dass kristalline Gesteine zwar kein offensichtlich rheologisches Langzeitverhalten im Sinne eines „Kriechens“ wie bei Salz- oder Tongestein zeigen, dass aber langzeitliche konstante Belastungen auch zu einem Bruch führen können, obwohl die Belastung deutlich unter der Festigkeitsgrenze liegt. Dieses Phänomen ist in der Literatur als „static

fatigue“ Verhalten bekannt. Das „static fatigue“ Verhalten wurden zuerst von Grenet (1899) an Glas beobachtet, der ein zeitverzögertes Bruchverhalten beschrieb. Als Ursache für dieses Verhalten wurde von Charles (1958 und 1959) und von Hillig & Charles (1965) das Phänomen der „stress corrosion“ angesehen, das vorhandene Defekte im Glas langsam wachsen lässt bis diese Defekte (Mikrorisse) eine kritische Größe erreichen und zu einem Bruch führen (Freiman 2000). „Stress corrosion“ geht mit einer Aktivierungsenergie einher, die eine Reaktion zwischen dem Material und dem Reagenz „Wasser“ auslöst. Diese Aktivierungsenergie wird signifikant durch Zugspannungen reduziert (Potyondy 2007). Das heißt, die Korrosionsreaktion läuft dort besonders schnell ab, wo die Zugspannungen am größten sind.

Risswachstum durch „stress corrosion“ unter Spannungseinfluss kann für fast alle Materialien durch die Beziehung von Spannungsintensität und Risswachstumsgeschwindigkeit beschrieben werden (Wiederhorn & Bolz 1970). Kristalline Gesteine haben eine heterogene und polykristalline Mikrostruktur; Risswachstum geschieht unter sprödem Bruchverhalten. Untersuchungsergebnisse an Glas sind daher durchaus übertragbar (Potyondy 2007, Bielus 1988). Abb. 3.7 zeigt eine typische Risswachstumskurve für Glas und Keramik.

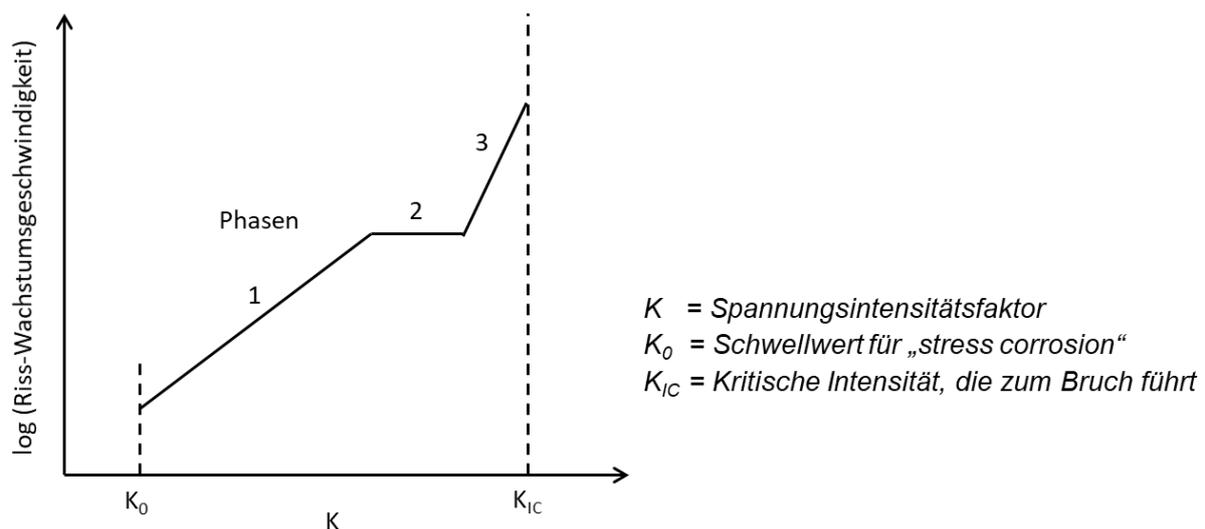


Abb. 3.7: Typische Risswachstumskurve für Glas und Keramik; (modifiziert nach Bielus 1988, Freiman 1984)

Jeder Riss wächst zunächst (Phase 1) stabil mit einer Wachstumsgeschwindigkeit. Diese erste Phase wird als „subkritisches Risswachstum“ bezeichnet. In dieser Phase wird das Wachstum durch die Korrosionsreaktionen an der Risspitze dominiert. In der zweiten Phase spielt der Transport des die Korrosion verursachenden Stoffes zur Risspitze eine größere Rolle und in Phase 3 kommt es durch rein mechanische Prozesse zur Ausbildung eines makroskopischen Risses (Bielus 1988). In dieser Grafik wird der Beginn der Phase 1 als Schwellwert für den Ablauf der „stress corrosion“ mit  $K_0$  bezeichnet. Unterhalb dieses Wertes findet keine „stress corrosion“ statt.

Damjanac & Fairhurst (2010) haben aufgezeigt, dass das oben beschriebene Verhalten des Risswachstums prinzipiell auch für kristalline Gesteine Gültigkeit hat. Abb. 3.8 zeigt Ergebnisse von Versuchen an Proben des Lac du Bonnet Granit in Kanada unter konstanter Belastung. Gemäß einer Analyse von Cruden (1970, 1971, 1974) lassen sich die Werte durch eine Exponentialfunktion zeitlich extrapolieren.

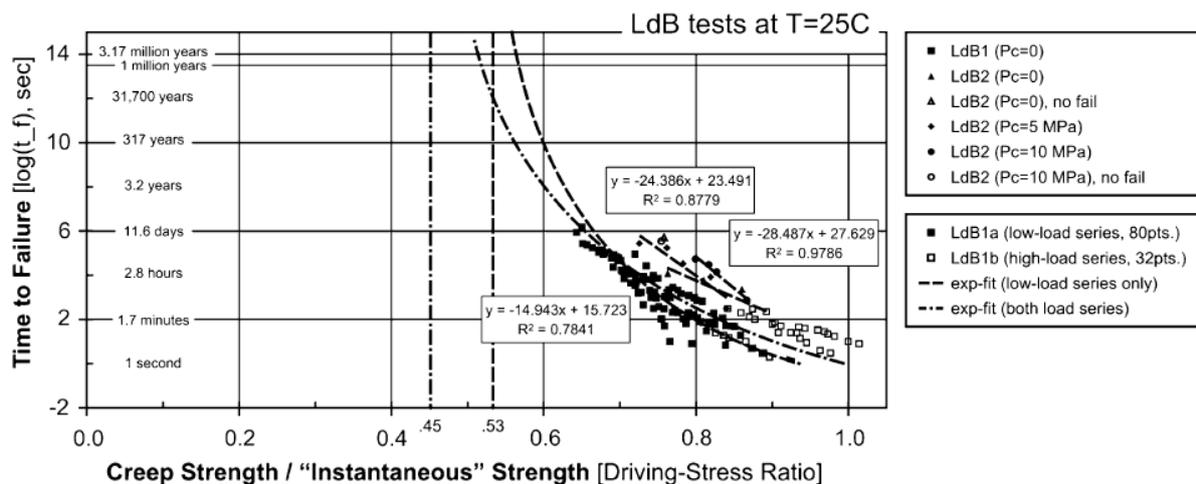


Abb. 3.8: Ergebnisse von Versuchen an Proben des Lac du Bonnet Granit in Kanada mit konstanter Belastung und exponentieller zeitlicher Extrapolation. Daten von Schmidtke & Lajtai (1985) und Lau et al. (2000) zusammengestellt in Potyondy (2007) nach Damjanac & Fairhurst (2010)

Gemäß dieser Analyse kann davon ausgegangen werden, dass es einen Schwellwert für die Spannung gibt, der sich aus Laboruntersuchungen, tektonischen Informationen sowie analytischen und numerischen Modellierungen zur Schwächung des Festigkeitsverhaltens durch „stress corrosion“ ableiten lässt. Dieser Schwellwert liegt im Bereich von 45-53 % der Kurzzeitfestigkeit.

Zur Verwendung im Rahmen einer Integritätsprüfung muss demnach zunächst eine Charakterisierung der durch Klüftigkeit reduzierten mechanischen Gebirgsfestigkeiten erfolgen. Aus der Literatur sind einige Klassifizierungsansätze bekannt, anhand derer die mechanischen Eigenschaften von geklüftetem Gebirge ermittelt werden können. Klassifizierungsansätze zur Gesteinscharakterisierung werden zu verschiedenen Zwecken in der Praxis benötigt. Dies betrifft beispielsweise das Design von untertägigen Auffahrungen oder die Spezifizierung eines notwendigen Ausbaus. In dem Zusammenhang ist es notwendig, geeignete Eingangsparameter, wie z. B. Verformungsparameter oder Festigkeitswerte, für numerische Auslegungs- und Designberechnungen zu spezifizieren. Diese Parameter werden prinzipiell am besten durch In-situ-Tests bestimmt. Allerdings sind solche Tests in der Planungsphase kaum möglich, da noch keine geeigneten Aufschlüsse zur Durchführung solcher In-situ-Untersuchungen zur Verfügung stehen. Um dennoch geeignete Eingangsparameter bzgl. der Gebirgseigenschaften zu erhalten, werden gängige Klassifizierungsansätze verwendet, mit deren Hilfe die benötigten Eingangswerte abgeleitet werden können.

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Klassifizierungsansätze entwickelt, von denen die folgenden vier die breiteste Anwendung in der Praxis erfahren:

- das RQD-System, „Rock Mass Designation“ (Deere et al. 1967)
- das RMR-System, „Rock Mass Rating“ oder das JCond<sub>89</sub>-System „Joint Condition Rating“ (Bieniawski 1973 und 1989)
- das Q-System, „Rock Mass Quality“ (Barton et al. 1974 und Barton 2002)
- das GSI-System „Geological Strength Index“ (Hoek & Brown 1997)

Für das Dilatanz-Kriterium findet im Weiteren das GSI-System Anwendung. Eine Kurzbeschreibung der anderen Klassifizierungssysteme ist im Anhang zur Information gegeben. Eine Übersicht über generell existierende Klassifizierungsansätze inklusive einer detaillierten Beschreibung ist beispielsweise in Abbas (2015) gegeben.

### 3.2.5 Das GSI-System

Das GSI-System („Geological Strength Index“) wird vornehmlich zur Abschätzung von Design-Parametern zur Modellierung verwendet. Prinzipiell ist das GSI-System das einzige Klassifizierungssystem, das eine direkte Ableitung von Gesteinsparametern wie beispielsweise der Festigkeit aus Feldbeobachtungen erlaubt (Hoek 1994 und Hoek 1998), wobei speziell der Klüftigkeitsgrad in die Bestimmung des GSI eingeht. Der GSI variiert je nach Grad der Klüftung zwischen 1 und 100 (vgl. Abb. 3.9) und berücksichtigt auch die Qualität der Aufführungsarbeiten durch den Indikator „Decreasing surface quality“.

Das im Hoek-Brown Ansatz beschriebene GSI-System ist im Prinzip ein universelles Gebirgs-Klassifikationssystem, das den Vorzug hat, ein geklüftetes Gebirge hinsichtlich seines integralen Festigkeitsverhaltens zu beschreiben. Ein Vorteil des GSI-Systems ist es auch, dass es bereits in der frühen Phase eines Projektes z. B. der im Rahmen der Standortauswahl durchzuführenden repräsentativen Sicherheitsuntersuchungen, verwendet werden kann, wenn nur wenig Informationen zur Verfügung stehen.

Eine gewisse Schwierigkeit in der Anwendung speziell für geklüftete Gesteinskörper besteht darin, dass die Klassifizierung in gewissen Grenzen subjektiv ist und entsprechende Fachkenntnis notwendig macht. Aus diesem Grund existieren Studien, die einführende Hilfestellung zur Anwendung geben. In Cai et al. (2004a,b) beispielsweise basiert die Hilfestellung auf der Verbindung zwischen beschreibender Geologie und messbaren Parametern wie beispielsweise Kluftabständen und Rauigkeiten. Eine besonders eindruckliche Hilfestellung wird in Hoek et al. (2013) gegeben. Hierin wird insbesondere eine Brücke zwischen dem RQD, dem  $J\text{Cond}_{89}$  (RMR) und dem GSI dergestalt geschlagen, dass eine direkte Beziehung zwischen dem GSI, dem RQD und dem  $J\text{Cond}_{89}$  angegeben ist. Das GSI-System vereinigt demnach prinzipiell mehrere der meist genutzten Klassifizierungen und wird im Folgenden als Grundlage für die Quantifizierung des Dilatanz-Kriteriums vorgeschlagen und näher erläutert.

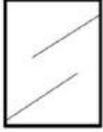
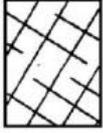
<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</b></p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p><b>SURFACE CONDITIONS</b></p> <p><b>VERY GOOD</b> Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p><b>GOOD</b> Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p><b>FAIR</b> Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p><b>POOR</b> Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p><b>VERY POOR</b> Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p> <p>STRUCTURE      DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
 <p><b>INTACT OR MASSIVE</b> - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80	70	60	N/A	
 <p><b>BLOCKY</b> - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70	60	50	40	
 <p><b>VERY BLOCKY</b>- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70	60	50	40	30	
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60	50	40	30	20	
 <p><b>DISINTEGRATED</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50	40	30	20	10	
 <p><b>LAMINATED/SHEARED</b> - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A	30	20	10	

Abb. 3.9: Schema zur Festlegung des GSI; N/A = Not applicable (Hoek & Brown 1997)

### 3.2.6 Anwendung des GSI für das Dilatanz-Kriterium

Aus den oben genannten Gründen wird es als pragmatisch angesehen, das GSI-System für den Einstieg in die Sicherheitsbewertung zu verwenden. Hoek und Brown haben in den letzten ca. 25 Jahren das GSI-System primär aus praktischen Erfahrungen entwickelt, welches den Grad der Klüftigkeit in die Berechnungen zum Festigkeitsverhalten eines Hartgesteins einbezieht (Hoek & Brown 1997, Hoek et al. 2002, Hoek 2007). Im Prinzip entspricht dies einem abgeminderten Mohr-Coulomb Stoffmodell für intaktes Gestein. Die entsprechenden Parameter für das Mohr-Coulomb Stoffmodell lassen sich aus den Hoek-Brown Parametern berechnen (Eberhardt 2010).

Ein Abriss der geschichtlichen Entwicklung des Hoek-Brown-Kriteriums ist in Hoek & Marinos (2007) beschrieben. Das Hoek-Brown-Kriterium basiert auf einer empirischen Ableitung, die aber von Zuo et al. (2015) mit einer theoretischen Herleitung ergänzt wurde. Eine Diskussion über die Breite der Anwendbarkeit und die Grenzen dieses Kriteriums ist in Marinos et al. (2005) beschrieben. Das Bruchkriterium nach Hoek und Brown ist folgendermaßen gegeben (Hoek et al. 2002, Eberhardt 2012):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{c0} \left( m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{c0}} + s \right)^a \quad (3.1)$$

wobei

$\sigma_{c0}$	=	einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins (ungeklüftet)
$\sigma'_1$	=	maximale effektive Hauptspannung
$\sigma'_3$	=	minimale effektive Hauptspannung

und

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (3.2)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (3.3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (3.4)$$

mit

$m_i$	=	Materialkonstante,
$GSI$	=	Geological Strength Index ( $GSI = 1, \dots, 100$ )
$D$	=	Zerrüttungsfaktor ( $D = 0, \dots, 1$ )

Die Druckspannungen sind hier mit einem positiven Vorzeichen belegt. Der Parameter  $m_b$  wurde eingeführt, um Vorschädigungen des Gebirges zu berücksichtigen (Abb. 3.10). Der Parameter  $m_i$  für das intakte Gebirge wird durch Mineralogie, Zusammensetzung und Korngröße des Gebirges bestimmt (Hoek et al. 1992). Der Exponent  $a$  wurde eingeführt, um geklüftetes Gebirge besser abbilden zu können durch Anpassung der Krümmung der einhüllenden Fehlerkurve im Bruchkriterium.

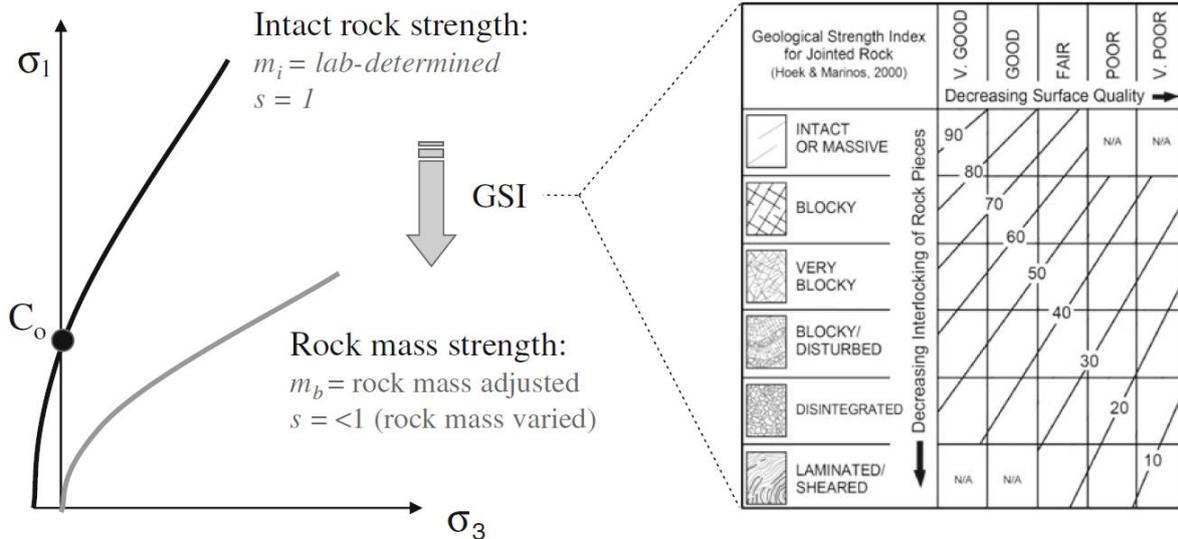


Abb. 3.10: Schematische Skalierung der Hoek-Brown Fehlerkurve ausgehend von der Kurve (Festigkeit) für intaktes Gestein bis zu der Kurve (Festigkeit) für stark geklüftetes Gestein (aus Eberhardt 2012)

Die Beziehung zwischen dem GSI und den Parametern  $m_b$ ,  $s$  und  $a$  wird in Hoek et al. (2002) intensiv diskutiert. Im Zuge dieser Diskussion wurde der Parameter  $D$  eingeführt, der die Oberflächenbeschaffenheit der Hohlraumkontur und damit die Qualität der Auffahrung, insbesondere bei Auffahrung mit Bohren und Sprengen, in die Berechnungen einbringt (vgl. horizontale Achse in Abb. 3.9 und Abb. 3.10). In Bertuzzi (2019) wird die Beziehung des GSI zu den Parametern  $m_b$ ,  $s$  und  $a$  vor dem Hintergrund großskaliger Bruchereignisse in Tunneln weiter spezifiziert.

Eine wesentliche Triebfeder für die Entwicklung des GSI-Systems war es, die Festigkeit und damit die Stabilität eines Gebirgsbereiches zu bestimmen, insbesondere, wenn dieser Bereich durch Blockung gekennzeichnet und damit von Klüften durchzogen ist. Setzt man in Gleichung (3.1) die minimale effektive Hauptspannung gleich Null ( $\sigma_3' = 0$ ), so lässt sich die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins gemäß folgender Gleichung berechnen (Hoek et al. 2002).

$$\sigma_c = \sigma_{c0} \cdot s^a \tag{3.5}$$

Setzt man in Gleichung (3.1) die minimale und die maximale effektive Hauptspannung gleich der Zugspannung ( $\sigma_3' = \sigma_1' = \sigma_t$ ) dann erhält man für die Zugspannung

$$\sigma_t = -\frac{s \cdot \sigma_{c0}}{m_b} \tag{3.6}$$

Mit Bezug auf Hoek (1983) repräsentiert dies formal die Bedingungen für einen bi-axialen Zug. Eine ausführliche Erläuterung dazu ist in Sari (2010) gegeben. Demnach kann für sprödbrüchiges Material, wie z. B. kristalline Gesteine, die einaxiale Zugfestigkeit gleich der bi-axialen Zugfestigkeit angenommen werden. Das heißt, mit Kenntnis der einaxialen Druckfestigkeit des intakten Gesteins sowie der Parameter des Hoek-Brown Bruchkriteriums  $m_b$ ,  $s$ , und  $a$ , lassen sich die einaxialen Druck- und Zugfestigkeiten des zu betrachtenden, mit Klüften durchzogenen, Gebirgsbereiches berechnen. In der Arbeit wird auch darauf hingewiesen, dass angenommen wird, dass die mittlere effektive Spannung  $\sigma_2'$  ohne Bedeutung ist, wohl wissend, dass

dies eine Vereinfachung darstellt. Mit Verweis auf Jaeger & Cook (1969) wird argumentiert, dass die mittlere Hauptspannung mit einem akzeptablen Fehler vernachlässigt werden kann. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass über die Querdehnung des Gesteins ggf. ein Einfluss auf die mittlere Hauptspannung erfolgen kann. Dies sollte durch entsprechende Analysen noch geklärt werden.

Für Standsicherheitsberechnungen ist es oft notwendig, nicht nur die Festigkeitswerte selbst zu kennen, sondern auch die residualen Festigkeiten. Das heißt, es müssen die Restfestigkeitswerte berücksichtigt werden, die sich nach dem Eintreten eines Bruchs einstellen. Für die Anwendung bzw. die Prüfung des Dilatanz-Kriteriums ist die Berücksichtigung von Restfestigkeiten i. d. R. nicht notwendig. Es sei in diesem Zusammenhang lediglich auf die Arbeiten von Cai et al. (2007) und Arzúa et al. (2014) verwiesen, in denen residuale Werte für die Hoek-Brown Parameter GSI,  $s$  und  $a$  abgeleitet bzw. Restfestigkeiten genannt werden.

### 3.2.7 Definition und Quantifizierung des Kriteriums

Es wird vorgeschlagen, das beschriebene Versagenskriterium von Hoek & Brown als Dilatanzkriterium zu verwenden.

#### „Dilatanz-Kriterium“

Es ist zu zeigen, dass der Spannungszustand unterhalb einer Grenze liegt, ab der das Entstehen von neuen, Fortpflanzen von vorhandenen oder Öffnen von geschlossenen Rissen innerhalb des Bewertungszeitraums möglich ist.

Gemäß der in der Kontinuumsmechanik üblichen Vorzeichenkonvention (Druckspannungen negativ, Zugspannungen positiv) gilt der folgende Zusammenhang zwischen den drei Hauptspannungen

$$\sigma_I \leq \sigma_{II} \leq \sigma_{III}$$

Mit dieser Vorzeichenkonvention zu den effektiven Hauptspannungen ergibt sich als mathematische Quantifizierung der Grenzfall des Dilatanzkriteriums (vgl. Thiedau et al. 2021):

$$\sigma'_{III} - \sigma'_I = F \cdot \sigma_{c0} \left( m_b \cdot \frac{-\sigma'_{III}}{F \cdot \sigma_{c0}} + s \right)^a \quad (3.7)$$

mit

$F$  = Spannungskorrosionsfaktor (Referenzwert = 0,4)

Ausgewertet wird ein Quotient, der angibt, wie weit der berechnete Spannungszustand von dem Grenzfall des Dilatanz-Kriterium entfernt ist und damit einen Ausnutzungsgrad bzw. eine Sicherheitsreserve quantifiziert. Das Dilatanzkriterium lautet demnach (vgl. auch Thiedau et al. 2021):

$$\frac{\sigma'_{III} - \sigma'_I}{F \cdot \sigma_{c0} \left( m_b \cdot \frac{-\sigma'_{III}}{F \cdot \sigma_{c0}} + s \right)^a} < 1.0 \quad (3.8)$$

Der Faktor  $F$  berücksichtigt den Prozess der oben erwähnten Spannungskorrosion. Gemäß der Analysen zu Abb. 3.4 ist von einer Entstehung von Mikrorissen  $\sigma_{ci}$  im Bereich von 40-60% der Kurzzeitfestigkeit  $\sigma_p$  auszugehen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass es einen Schwellwert für Spannungen gibt, der langfristig bei konstanter Belastung zur Schwächung des Festigkeitsverhaltens durch Spannungskorrosion führt. Dieser Schwellwert liegt nach heutigem Kenntnisstand im Bereich von 45-53 % der Kurzzeitfestigkeit. Aus Gründen der Konservativität wird für beide Fälle ein unterer Wert von 40 % angesetzt, so dass als Referenzwert  $F = 0,4$  gewählt wurde.

Dieser Wert ist im Zuge der Sicherheitsuntersuchungen zur Standortauswahl bei Vorliegen standortbezogener Daten zu überprüfen und ggf. anzupassen. Im ersten Ansatz werden folgende zunächst konservative, Referenzwerte für die Eingangsparameter für die Gleichungen (3.3) bis (3.6) des Hoek-Brown-Kriteriums vorgeschlagen:

$m_i$	=	$25 \pm 5$	für Diorit (Vásárhelyi et al. 2016, Hoek 2007)
$GSI$	=	75	(Hoek 2001)
$D$	=	0.8	für Sprengauffahrung im Kristallin in schlechter Qualität (Hoek et al. 2002)

Der Zerrüttungsfaktor  $D$  wurde mit 0,8 sehr konservativ angesetzt. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass bei einem schonenden Verfahren mit Bohren und Sprengen ein deutlich niedriger Wert angesetzt werden kann. Diese Werte sind im Zuge einer Standorterkundung bzw. Weiterentwicklung der Methodik der Sicherheitsuntersuchungen zu überprüfen und ggf. anzupassen.

### 3.3 Fluiddruck-Kriterium

Mit der Auswertung des Fluiddruck-Kriteriums ist zu zeigen, dass

*„die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einer erheblichen Zunahme von Fluidwegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt“* (EndlSiAnfV 2020, §6 (2)).

Zur Quantifizierung des Fluiddruck-Kriteriums werden im Folgenden die wesentlichen Begriffe aus dem zitierten Abschnitt diskutiert.

#### 3.3.1 Bestimmung der zu erwartenden Fluiddrücke

Um die zu erwartenden Fluiddrücke zu bestimmen, können grundsätzlich zwei Vorgehensweisen unterschieden werden:

- 1) Die Abschätzung von den zu erwartenden Fluiddrücken und
- 2) die räumlich und zeitlich aufgelöste, prozessbasierte Berechnung von Fluiddrücken.

Für das Barrieregestein Steinsalz wird in den Vorhaben VSG (Kock et al. 2012), KOSINA (Liu et al. 2018, Bollingerfehr et al. 2018) und RESUS (Bertrams et al. 2020, Mönig et al. 2020) eine Abschätzung des zu erwartenden Fluiddrucks durch die Definition eines fiktiven Porendrucks, der sich aus einer stehenden Wassersäule in der betrachteten Teufe ergeben würde, verwendet. Nach Bertrams et al. (2020) werden hydraulische Prozesse im Salzgestein dort nicht abgebildet, da unverritztes Salzgestein technisch dicht sei (Hunsche et al. 2003), was auch durch natürliche Analoga bestätigt werde (Rempe 2014).

Für das Barrieregestein Tongestein werden hingegen in den Forschungsprojekten ANSICHT (Maßmann & Ziefle 2017), RESUS (Alfarra et al. 2020a,b) und auch international (Armand et al. 2017, Leupin et al. 2016) die Fluiddrücke im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen explizit berechnet.

Für das Barrieregestein Kristallin liegt keine Referenz zur Bestimmung der zu erwartenden Fluiddrücke im Hinblick auf die Auswertung des Fluiddruck-Kriteriums vor. Als Teil der Sicherheitsuntersuchungen zum schwedischen Endlagerkonzept, das nicht auf dem kristallinen Barrieregestein als wesentliche Barriere basiert, werden thermische, hydraulische und mechanische (THM) Prozesse unter anderem dahingehend analysiert, in welchen Bereichen es zu Verformungen an bestehenden Klüften bis zum vollständigen Aufhebeln („hydraulic jacking“) kommen kann. Die Fluiddrücke werden dazu in separierten Modellen berechnet, wobei insbesondere die Effekte der Eisauflast bei Gletscherüberfahrungen und von Permafrostbedingungen berücksichtigt und thermomechanisch verursachte Beeinflussungen durch die Einlagerung vernachlässigt werden (vgl. Hökmark et al. 2006, Hökmark et al. 2010).

Es ist grundsätzlich wirtsgesteinsspezifisch und abhängig vom zu bewertenden Versagensmechanismus zu prüfen, wie hydraulische Prozesse im Barrieregestein bei Sicherheitsanalysen zu betrachten sind. Im generischen Modell des „multiplen ewG“ wird von einem ewG ausgegangen, der keine bzw. nur sehr gering hydraulisch wirksame Klüfte aufweist und nur eine sehr geringe Porosität hat (Mrugalla et al. 2020). Allerdings weist der Bereich der Durchlässigkeitsbeiwerte (in aktueller Version:  $10^{-15}$ ... $1e^{-12}$  m/s) darauf hin, dass ein zusammenhängender, durchfließbarer Porenraum bzw. ein Geflecht von Mikroklüften bestehen kann. Hydraulische Prozesse können daher nicht vernachlässigt werden und es wird eine explizite numerische Berechnung zur Bestimmung der zu erwartenden Fluiddrücke vorgeschlagen.

Hierfür muss das Endlagersystem und insbesondere die Geometrien, hydraulischen Rand- und Anfangsbedingungen (Porenwasserdrücke, Grundwasserbewegungen) und wichtige Eigenschaften, wie beispielsweise Gesteinspermeabilitäten und Porositäten hydrogeologisch charakterisiert und parametrisiert sein. Die Störungen des hydrogeologischen Systems durch die Auffahrungen und die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle müssen bei der Berechnung der zu erwartenden Fluiddrücke ebenfalls betrachtet werden. Im Hinblick auf hohe Fluiddrücke muss die thermisch bedingte Ausdehnung von Fluiden und die Entwicklung von Gasen im Einlagerungsbereich betrachtet werden.

### 3.3.2 Fluiddruckbelastbarkeit und Zunahme von Fluidwegsamkeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Fluiddruckbelastbarkeit eines Gebirgskörpers dann überschritten wird, wenn die hydraulischen Drücke im Gebirge, also z. B. in Poren, in Klüften oder an der Grenze des Gebirgskörpers bzw. des ewG, so hoch sind, dass es zu einer Zugbelastung kommt, die höher als die Zugfestigkeit des Gebirges ist. Die Zunahme von Fluidwegsamkeiten durch Rissentstehung oder Erweiterung kann dann nicht ausgeschlossen werden. Ob diese Zunahme von Fluidwegsamkeiten erheblich ist, muss in Abhängigkeit der Größe, zeitlichen Entwicklung und Lage der Bereiche, in denen eine Überschreitung nicht ausgeschlossen werden kann, vor dem Hintergrund des betrachteten Endlagersystems bewertet werden. Im Falle mechanischer Diskontinuitäten im Gebirge wird eine Zug- oder Rissfestigkeit des Gesteins aus Gründen der Konservativität nicht angesetzt, da diese senkrecht zu ihrer Diskontinuitätsfläche je nach Verheilungsgrad Zugkräfte nur bedingt übertragen können, also eine geringe oder keine Zugfestigkeit aufweisen. Dies ist in dem generischen Modell des Endlagersystems (Mrugalla et al. 2020) der Fall. Allein das Auftreten von

Zugspannung genügt hier, um das Kriterium zu verletzen. Analog wurde auch in den Forschungsprojekten ANSICHT (Jobmann et al. 2015) und RESUS (Alfarra et al. 2020a,b) vorgegangen. Das Fluiddruck-Kriterium wird damit einem Zugspannungs-Kriterium gleichgesetzt.

### 3.3.3 Ansatz der effektiven Spannungen

Bei einer expliziten numerischen Berechnung werden die im Korngerüst wirkenden effektiven Spannungen und die Fluiddrücke zeitlich und örtlich aufgelöst berechnet, sodass auch die Auswertung des Kriteriums zeitlich und örtlich differenziert betrachtet werden muss.

Auf Grund der umfangreichen Kopplungen zwischen thermischen, mechanischen und hydraulischen (THM) Prozessen wird bei den numerischen Modellberechnungen zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) ein Ansatz verfolgt, der die wesentlichen Prozesskopplungen berücksichtigt.

Die hydraulisch-mechanische Kopplung basiert auf dem Ansatz der effektiven Spannungen, der auf Terzaghi & Fröhlich (1936) zurückgeführt werden kann. Hiernach stehen die totalen (äußeren) Spannungen  $\sigma^{tot}$  im Gleichgewicht zum Porendruck  $p$ , der mit dem Biot-Koeffizienten  $\alpha$  gewichtet ist, und den effektiven Spannungen  $\sigma^{eff}$ , die auf dem Korngerüst wirken. Der theoretische Hintergrund dazu ist in Biot (1955) und Biot & Willis (1957) beschrieben.

$$\sigma^{eff} = \sigma^{tot} + \alpha \cdot p \cdot \mathbf{1} \quad (3.9)$$

Ein positiver Wert des Porendrucks  $p$  charakterisiert dabei einen allseitig wirkenden Fluiddruck. Nach der hier verwendeten Vorzeichenkonvention für die Spannungen ( $\sigma^{tot}$ ,  $\sigma^{eff}$ ) beschreiben negative Spannungswerte einen Druckzustand während positive Werte Zugspannungen darstellen. Für die Formulierung des mechanischen Verhaltens (Spannungs-Dehnungs-Verhalten, siehe Dilatanz-Kriterium) wird im Allgemeinen die effektive Spannung verwendet. Durch den Ansatz der effektiven Spannungen ist also der Einfluss des Porendrucks im Gestein in der Betrachtung der Spannungen implizit berücksichtigt. Der effektive Spannungszustand ist demnach sowohl durch mechanische Belastung, z. B. durch thermo-mechanische Einwirkungen, als auch durch hydraulische Prozesse oder deren Kombination beeinflusst.

Der Biot-Koeffizient ist ein Maß für den Einfluss des Fluiddruckes auf das Verformungsverhalten eines Gebirges. Je größer er ist, umso stärker ist der Einfluss der Porendrücke auf das Deformationsverhalten. Beispiele für Biot-Koeffizienten kristalliner Gesteine sind in Tab. 3.2 angegeben.

Tab. 3.2: Beispiel für Biot-Koeffizienten kristalliner Gesteine

Gestein	Biot-Koeffizient (intakt / geklüftet)	Quelle
Charcoal Granit, USA	0,27	Detournay & Cheng (1993)
Westerly Granit, Kanada	0,47	Detournay & Cheng (1993)
Inada Granit, Japan	0,7 - 0,9 / ~1,0	Dassanayake et al. (2014)
Aue Granit, Deutschland	0,35 – 0,41 / ~ 1.0	Tan & Konietzky (2017)

Der Biot-Koeffizient ist definiert als:

$$\alpha = 1 - \frac{C_s}{C_m} \quad (3.10)$$

mit den Kompressibilitäten  $C_S$ ,  $C_m$  der Gesteinskörner bzw. des gesamten drainierten Mediums. Die Kompressibilität des drainierten Mediums  $C_m$  schließt die der Gesteinskörner mit ein, sodass sie stets größer ist als  $C_S$ . Dementsprechend variiert der Biot-Koeffizient zwischen 0 und 1, wobei empirisch nachgewiesen ist, dass er nicht kleiner werden kann als die Porosität (Fjaer et al. 1992). In ungestörten intakten Kristallingestein ist der Porenraum sehr klein, sodass aus der Kompressibilität des Porenraums nur geringe Anteile in die Kompressibilität des Mediums  $C_m$  eingehen. Daher nähern sich beide Kompressibilitäten an und der Biot-Koeffizient strebt gegen 0. In Geomaterialien, die eine hohe Kompressibilität des Porenraums im Vergleich zu der der Körner aufweisen, wie z. B. in Böden, strebt der Biot-Koeffizient hingegen gegen 1 (z. B. Lewis & Schrefler 1987). In einem stark gestörten Kristallkörper kann, wie bei Böden, davon ausgegangen werden, dass die Kompressibilität der Gesteinskörner im Vergleich zu der des drainierten Mediums sehr klein ist und damit der Biot-Koeffizient nahe 1 liegt. Folglich ist der Biot-Koeffizient abhängig von dem Zerrüttungsgrad, der örtlich und zeitlich variieren kann. Bei Berechnungen wird er dennoch oft vereinfachend als konstant angenommen. Mögliche Variationen des Biot-Koeffizienten werden im Rahmen von Forschungsarbeiten der TU Bergakademie Freiberg an kristallinen Gesteinsproben aus dem Aue Granit in Deutschland unter Berücksichtigung ihres Deformations- und Bruchverhaltens untersucht (Tan et al. 2015 und Tan & Konietzky 2017). Ein Extremfall ergibt sich, wenn man die Verhältnisse an einem diskreten Riss betrachtet, der idealisiert betrachtet eine Porosität von 1 aufweist. In diesem Fall ist der Biot-Koeffizient als 1 anzusetzen, da keine Kompressibilität von Körnern berücksichtigt werden kann.

Nach dem Konzept des „multiplen ewG“ sind an den Grenzen der ewG hydraulisch aktive Klüfte zu erwarten. Da mit dem Fluiddruck-Kriterium auch die Verhältnisse an den Grenzen des ewG geprüft werden sollen, also insbesondere eine Rissentstehung oder -fortpflanzung in den ewG hinein ausgeschlossen werden soll, muss hier ein Biot-Koeffizient von 1 angesetzt werden. Wenn ein konstanter Biot-Koeffizient in den Betrachtungen des Kriteriums angesetzt wird, ist folglich 1 zu wählen, um die Auswirkung von Fluiddrücken nicht zu unterschätzen.

### 3.3.4 Definition und Quantifizierung des Kriteriums

Zur rechen-technischen Auswertung des Fluiddruck-Kriteriums muss eine Hauptwertanalyse des effektiven Spannungstensor  $\sigma^{eff}$  durchgeführt werden, um Zugspannungen zu identifizieren. Die drei effektiven Hauptspannungen werden wie folgt der Größe nach sortiert:

$$\sigma_I \leq \sigma_{II} \leq \sigma_{III}$$

Der Index „III“ symbolisiert also die größte Zugspannung, bzw. die kleinste Druckspannung. Das Fluiddruck-Kriterium ergibt sich somit formelmäßig zu:

$$\sigma_{III}^{eff} = \sigma_{III}^{tot} + \alpha \cdot p < 0 \quad (3.11)$$

wobei gemäß den obigen Ausführungen der Biot-Koeffizienten  $\alpha = 1$  zu setzen ist. Der Poren-  
druck  $p$  symbolisiert im Falle der Vollsättigung (Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt) den Porenwasserdruck. Somit wird das Fluiddruck-Kriterium wie folgt definiert:

#### „Fluiddruck-Kriterium“

Es ist zu zeigen, dass die totalen Gebirgsspannungen stets größer sind, als der anstehende Porendruck.

Dieses Kriterium findet sinngemäß breite Anwendung bei geotechnischen Fragestellungen, z. B. in der Öl- und Gasindustrie, im Kavernenbau sowie in der Geothermie (z. B. Hubbert & Willis 1972). Falls ein Gasdruck berücksichtigt werden muss, kann ein mittlerer Porendruck wie folgt mit der Sättigung der fluiden Phase  $S_l$  und dem Kapillardruck  $p_c$  bestimmt werden (Lewis & Schrefler 1987):

$$p = p_g - S_l \cdot p_c \quad (3.12)$$

Der Kapillardruck wirkt dem Druckaufbau in den Poren entgegen. Aus Gründen der Konservativität wird bei der Auswertung des Kriteriums auf die abmindernde Wirkung des Kapillardrucks verzichtet. Damit ergibt sich, dass bei Gasdruckaufbau in der Teilsättigung der Porengasdruck  $p_g$  dem Porendruck  $p$  entspricht. Das Fluiddruck-Kriterium besagt also, dass der maximale Gasdruck nicht die minimale totale Druckspannung übersteigen darf.

Werden bei der Analyse zur Integrität hydraulisch-mechanisch (HM) gekoppelte Berechnungsansätze nach dem Konzept der effektiven Spannungen verwendet, muss die effektive Spannung stets im Druckbereich liegen. Bei dieser Analyse sollte nicht die abschwächende Wirkung des Biot-Koeffizienten oder der Kapillardrücke auf den Porendruck belastet werden.

Das Fluiddruck-Kriterium wird hier also im Sinne von einem fluiddruckgetriebenen Zugversagen interpretiert. Grundsätzlich kann allerdings jede Porendruckerhöhung zu einer Verschiebung des effektiven Gebirgsspannungszustandes in Richtung geringerer Druckspannungen unter Beibehaltung des Spannungsdeviators führen. Dies kann die Entstehung von Scherbrüchen zur Folge haben. Bei gekoppelten HM-Berechnungen wird durch das Konzept der effektiven Spannungen dieser Versagensfall allerdings implizit bei der Auswertung des Dilatanz-Kriterium berücksichtigt.

### 3.4 Temperatur-Kriterium

Gemäß den Sicherheitsanforderungen ist zur Bewertung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu prüfen und darzustellen, dass (EndlSiAnfV 2020, §5, Absatz 2, Punkt 4)

*„durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird ...“*

#### 3.4.1 Definition und Quantifizierung des Kriteriums

Im Standortauswahlgesetz wird für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aus Vorsorgegründen eine Grenztemperatur festgelegt. Dazu heißt es (StandAG 2017, §27 Absatz 4):

*„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“*

Aus diesem Grund wird das Temperatur-Kriterium zunächst wie folgt definiert:

#### **„Temperatur-Kriterium“**

Es ist nachzuweisen, dass an der Behälteroberfläche eine Temperatur von 100°C nicht überschritten wird.

Im Folgenden wird geprüft, ob und falls ja, inwieweit eine Abweichung von dieser vorläufigen Grenztemperatur für die Einlagerungsoption „multipler ewG“ möglich bzw. sinnvoll wäre.

### 3.4.2 Diskussion thermisch bedingter Einwirkungen

Mit Blick auf die Aussagen in den Sicherheitsanforderungen ist zunächst zu klären, was unter einer „unzulässigen“ Beeinflussung der Barrierewirkung durch Temperaturerhöhung zu verstehen ist. Aus diesem Grund werden zunächst Effekte identifiziert und diskutiert, die eine Beeinflussung durch Temperatureinwirkung hervorrufen. Anschließend erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Relevanz für die Sicherheitsbewertung. Die Diskussion hinsichtlich der Temperatureinwirkungen innerhalb eines ewG erfolgt dabei gemäß folgender Sortierung:

- Hydraulische Aspekte
- Mechanische Aspekte
- Thermische Aspekte
- Chemische Aspekte
- Mineralogische Aspekte
- Mikrobiologische Aspekte

#### 3.4.2.1 Hydraulische Eigenschaften

Im Falle der Einlagerungsoption „multipler ewG“ wird davon ausgegangen, dass innerhalb der einzelnen ewG-Zellen keine solchen hydraulisch wirksamen Klüfte vorkommen, die in ihrer Gesamtheit die geforderten Durchlässigkeitseigenschaften eines ewG gemäß StandAG überschreiten (StandAG 2017). Dennoch wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass diese ewG-Zellen nicht völlig frei von Klüften sind. Kleinere ggf. mineralisierte und damit mehr oder weniger geschlossene Klüfte, von denen angenommen werden muss, dass sie eine gegenüber der Gesteinsmatrix erhöhte Permeabilität besitzen, werden in jedem Fall vorhanden sein. Insofern wird bei den folgenden Analysen besonderes Augenmerk auf Veränderungen der hydraulischen Eigenschaften von Klüften gelegt.

##### 3.4.2.1.1 Permeabilität

Eine Veränderung der Permeabilität von geklüftetem kristallinen Gestein wurde in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht. Morrow et al. (2001) beispielsweise untersuchten derartige Veränderungen an Klüften unter hydrothermalen Bedingungen. In dieser Studie wurde die Permeabilität sowohl von geklüftetem Granit als auch, zum Vergleich, von intaktem Granit bei verschiedenen Temperaturen im Bereich von 150-500°C gemessen. Die Proben wurden in mehrfachen Zyklen mit einer Porenlösung bei Differenzdrücken von 2 MPa über 40 Tage durchströmt. Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 3.11 dargestellt.

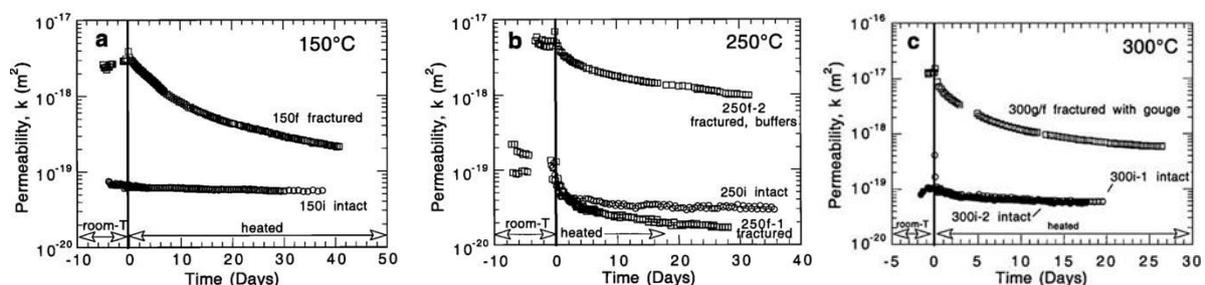


Abb. 3.11: Permeabilität als Funktion der Zeit für geklüftete und intakte Granit-Proben bei unterschiedlichen Temperaturen (aus Morrow et al. 2001)

Es zeigt sich, dass bei den intakten Proben eine nur geringe Verringerung der Permeabilität feststellbar ist. Bei den geklüfteten Proben dagegen ist eine signifikante Reduzierung der Permeabilität zu sehen. Elektronen-mikroskopische Untersuchungen der Kluftoberflächen ergaben, dass Lösungs- und Ausfällungserscheinungen mit Mineralwachstum die Ursache dafür sind. Das Mineralwachstum korrespondiert mit der Umgebungstemperatur und führt dazu, dass die Klüfte mit der Zeit verstopft werden, so dass sich die Permeabilität der Kluft im Versuchszeitraum um mehr als eine Größenordnung reduziert.

In einer älteren Arbeit wurde von Morrow et al. (1985) die Permeabilität von vier verschiedenen nicht geklüfteten kristallinen Gesteinen gemessen, die eine unterschiedliche Mineralzusammensetzung hatten. Es handelte sich um Granit, Gabbro, Anorthosit und Quarzit. Im Unterschied zu den oben beschriebenen Untersuchungen wurden die Proben nicht in einer konstanten Temperaturumgebung untersucht, sondern einem Temperaturgradienten ausgesetzt. Mit diesen Versuchsbedingungen sollten die In-situ-Bedingungen nachgestellt werden, die der Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen eher entsprechen, da davon auszugehen ist, dass die Temperaturen ausgehend vom Behälter in Richtung umgebendes Gebirge abnehmen. Im Versuch wurden die Proben bei einem Temperaturgradienten zwischen 250°C und 60°C über eine Versuchsdauer von 20 Tagen vermessen. Mit Ausnahme des Quarzits reduzierte sich die Permeabilität der Gesteine im Versuchszeitraum um etwa eine Größenordnung. Bei Quarzit waren es zwei Größenordnungen. In Abb. 3.12 (links) sind die Ergebnisse in normierter Form aufgetragen. Die Messwerte wurden jeweils auf den Anfangswert normiert, um die Veränderungen deutlich zu machen.

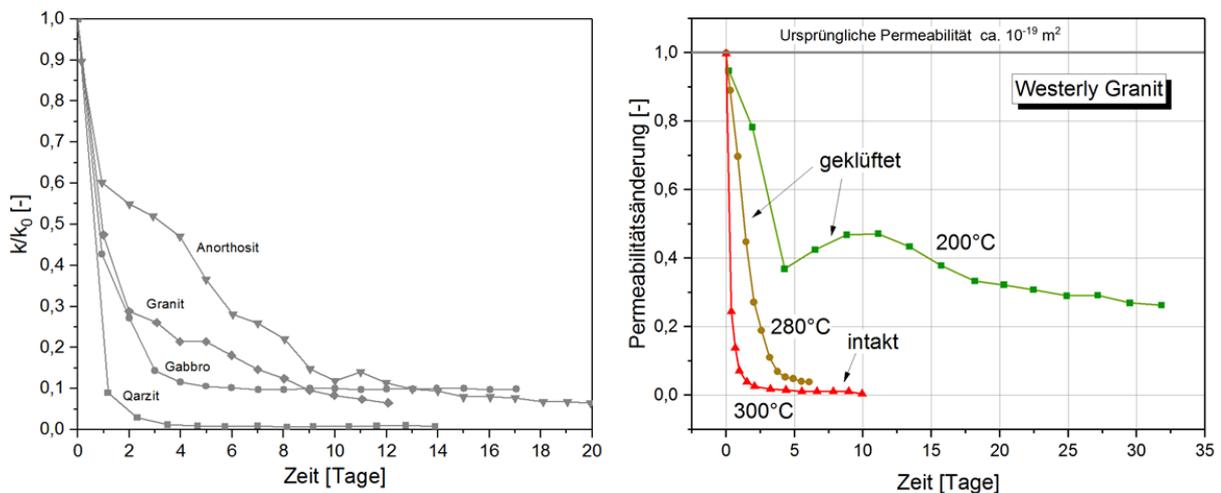


Abb. 3.12: Links: normierte Permeabilität von 4 verschiedenen kristallinen Gesteinen (neu gezeichnet nach Morrow et al. 1985). Rechts: auf den jeweiligen Anfangswert normierte Permeabilität von drei Granitproben, die bei verschiedenen Temperaturen vermessen wurden (neu gezeichnet gemäß Morrow et al. 1981)

Es zeigt sich, dass bei der Quarzit-Probe die Reduzierung der Permeabilität deutlich schneller und stärker ausfällt, als bei den anderen Proben. Die Ursache dafür wird in der vergleichsweise hohen Löslichkeit von Quarz gesehen, so dass bei erhöhter Temperaturumgebung eine vergleichsweise größere Mineralmenge gelöst wird, die im kälteren Bereich der Proben dann wieder ausfällt. Durch diesen Lösungs- und Ausfällungsprozess werden die Porenräume, die vornehmlich an Korn- bzw. Mineralgrenzen oder als Mikrorisse vorhanden sind, verstopft, so dass die Permeabilität insgesamt verringert wird. Das bedeutet auch, dass die Mineralzusammensetzung des Gesteins, speziell im Hinblick auf ihre Löslichkeit, durchaus von Bedeutung ist,

wenn es darum geht, die zu erwartende Reduzierung der Permeabilität durch Lösungs- und Ausfällungsprozesse einzuschätzen.

In einer vorangegangenen Arbeit untersuchten Morrow et al. (1981) die Permeabilitätsveränderungen von einer intakten und zwei geklüfteten Granitproben bei unterschiedlichen Temperaturen. Die intakte Probe wurde bei 300°C vermessen, während die beiden geklüfteten Proben bei 200°C und 280°C untersucht wurden. Bereits in diesen Untersuchungen wurde eine Verringerung der Permeabilität mit fortschreitender Zeit beobachtet (Abb. 3.12, rechts). Es zeigte sich, dass, wie zu erwarten, die Stärke der Verringerung der Permeabilität abhängig ist von der Umgebungstemperatur. Je höher die Temperatur, desto schneller wird die Permeabilität reduziert. Die Ursachen sind auch hier in Lösungs- und Ausfällungsprozessen zu suchen. Dies belegen auch elektronen-mikroskopische Aufnahmen wie beispielsweise in Abb. 3.13 dargestellt. Darin ist deutlich die Ablagerung von Silizium-Dioxid und kalziumreichem Zeolit zu erkennen, die den für eine Strömung verfügbaren Porenraum signifikant reduzieren.

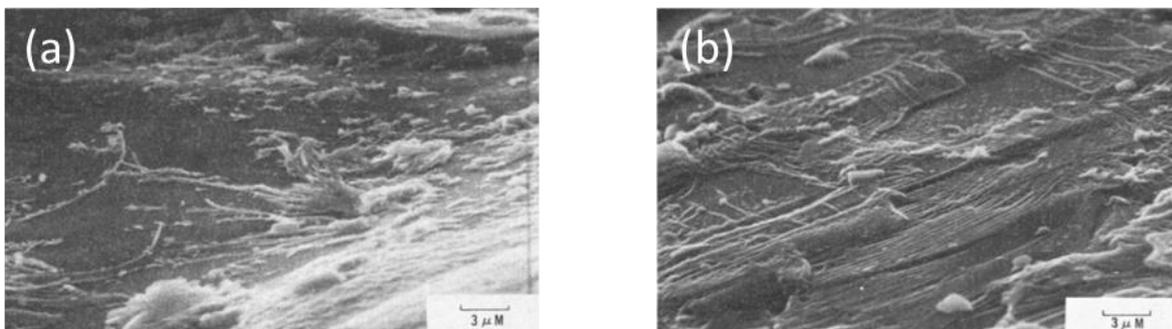


Abb. 3.13: Elektronenmikroskopische Aufnahmen (SEM) von geklüfteten Westerly-Granitproben, (a) Ausfällungen von  $\text{SiO}_2$  an Kornoberflächen, (b) Ausfällungen von Ca-reichem Zeolit an Kornoberflächen (aus Morrow et al. 1981)

Etwa zu gleichen Zeit untersuchten Moore et al. (1983) chemische Reaktionen in Granitproben, die einem Temperaturgradienten ausgesetzt wurden. Untersucht wurden Barre-Granit und Westerly-Granit in einem Temperaturgradienten von 300°C bis 80°C. Die Messungen ergaben eine Permeabilitätsverringerung von etwa 2 Größenordnungen im Versuchszeitraum von 1-3 Wochen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.14 dargestellt.

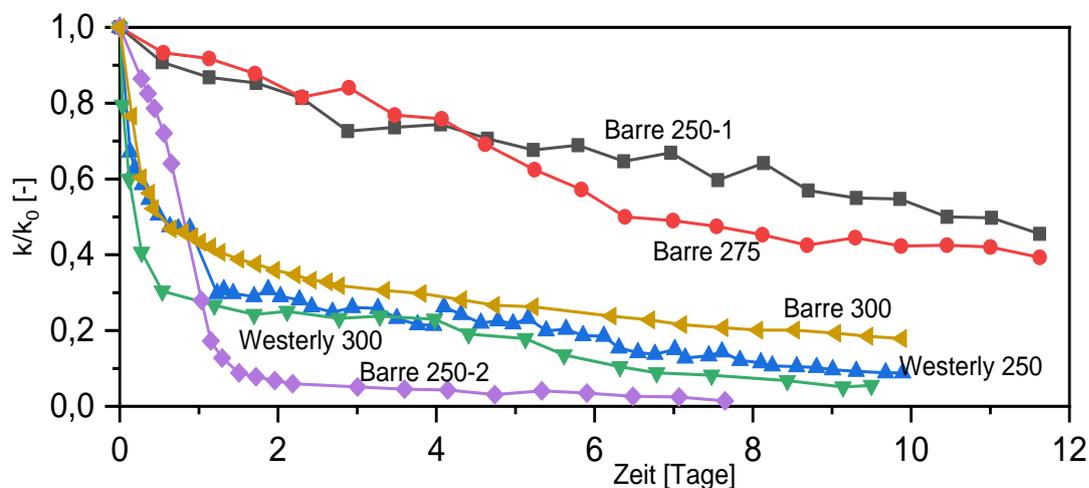


Abb. 3.14: Veränderungen der Permeabilität von Barre-Granit und von Westerly-Granit, die einem Temperaturgradienten von 300°C bis 80°C ausgesetzt wurden und die mit Lösungen in unterschiedlicher Geschwindigkeit durchströmt wurden (Daten aus Moore et al. 1983)

Die Intensität der Reduzierung der Permeabilität ist abhängig sowohl von dem Temperaturgradienten dem die Proben ausgesetzt sind als auch von der Fließrate der Lösung, mit der die Proben durchströmt werden. Bei höheren Temperaturen ist die Reaktionskinetik zwangsläufig erhöht, wohingegen bei schneller strömender Lösung weniger Zeit für Lösungs- und Ausfällungsprozesse bleibt. Letzteres wird besonders deutlich an den Ergebnissen der Versuche Barre 300 und Barre 250-2. Trotz der höheren Temperatur im Versuch Barre 300 wird die Permeabilität deutlich langsamer reduziert als in dem Versuch Barre 250-2. Hier spielt die Zeit, die der Lösung für Reaktionen mit dem Gestein zur Verfügung steht eine größere Rolle als die Höhe der Temperatur.

Ähnliche Versuche wurden auch in neuerer Zeit durchgeführt. Farough et al. (2016) untersuchten fünf künstlich geschädigte ultramafische Gesteinsproben hinsichtlich ihrer Permeabilität unter Temperatureinfluss. Durch die künstliche Schädigung sollte das Vorhandensein von Klüften nachgestellt werden, um zu untersuchen, wie sich die Permeabilität speziell dieser Klüfte unter Temperatureinfluss verhält. Die Proben wurden unter vollständiger Einspannung bis auf 260°C erhitzt und die Permeabilität als Funktion der Zeit gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.15 dargestellt. Alle fünf ultramafischen Proben zeigen eine Verringerung der Permeabilität mit fortschreitender Zeit. Die Ursache für die Verringerung der Permeabilität ist auch hier wieder darin zu sehen, dass Ausfällungserscheinungen in den Klüften stattfinden, die durch elektronen-mikroskopische Aufnahmen nachgewiesen wurden (Abb. 3.15).

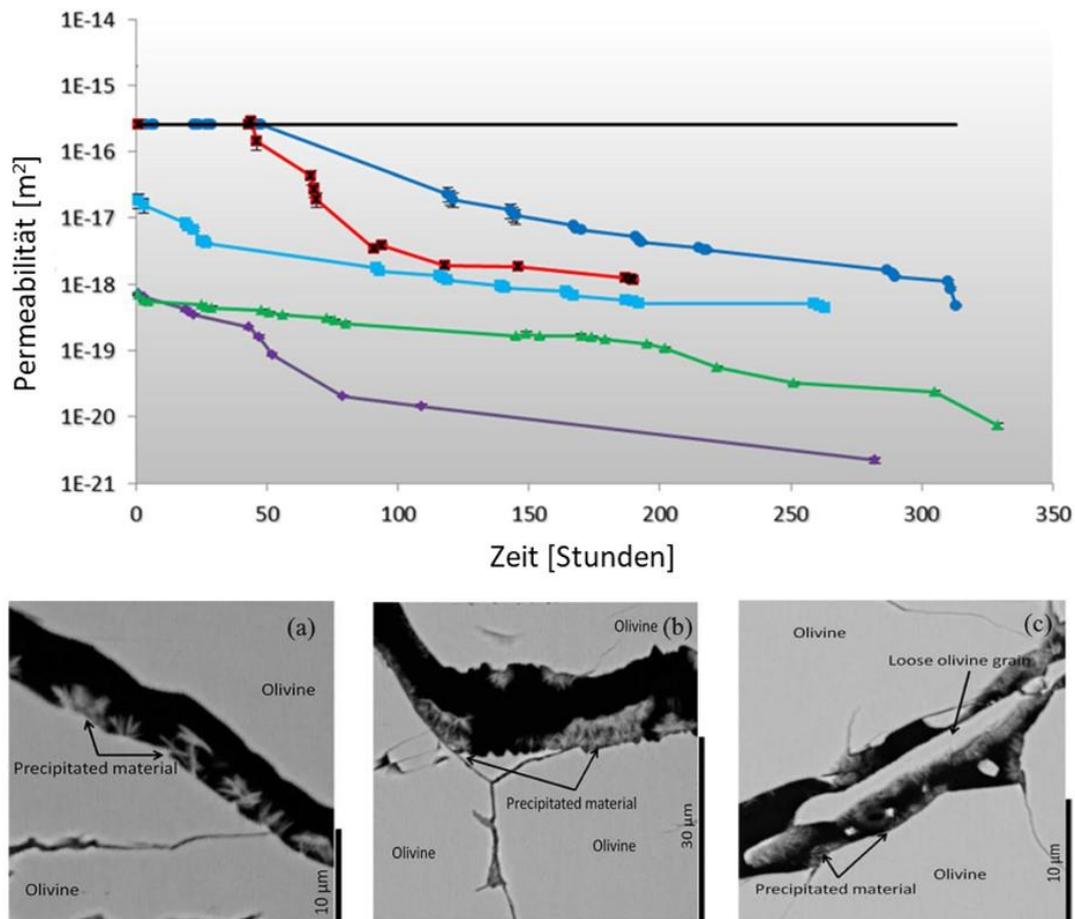


Abb. 3.15: Gemessene Permeabilität von 5 unterschiedlichen ultramafischen Gesteinsproben als Funktion der Zeit bei einer Umgebungstemperatur von maximal 260°C (links) und elektronen-mikroskopische Aufnahmen zur Dokumentation von Ausfällungserscheinungen in Klüften (rechts), (aus Farough et al. 2016)

In Dwivedi et al. (2008) sind Ergebnisse aus Artemieva (1997) wiedergegeben, die eine Reduzierung der Permeabilität von Proben des Westerly-Granits mit zunehmender Temperatur dokumentieren. Die Versuche wurden bei Drücken von 10, 50 und 100 MPa in einem Temperaturbereich von 50-300°C durchgeführt (Abb. 3.16). In allen Fällen ist eine deutliche Verringerung der Permeabilität mit zunehmender Temperatur feststellbar.

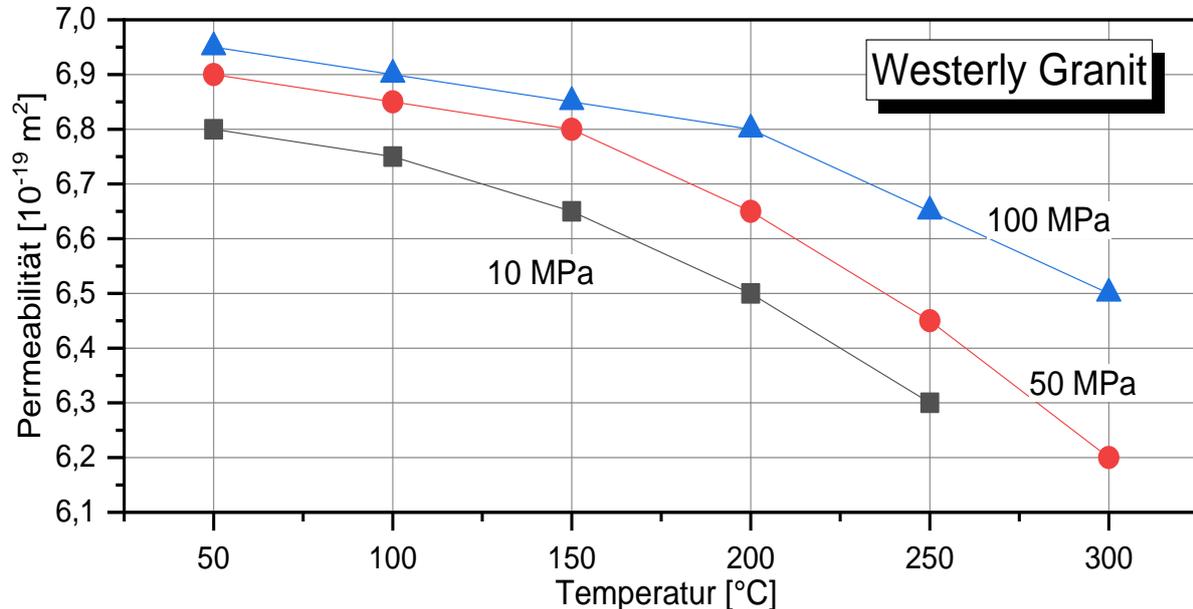


Abb. 3.16: Permeabilität von Westerly Granitproben in Abhängigkeit von der Temperatur (neu gezeichnet gemäß Dwivedi et al. 2008 mit Werten aus Artemieva 1997)

Ein etwas anderes Verhalten zeigen Untersuchungen an Quarz-Monzonit aus Geothermiebohrungen in Los Alamos, USA. Dort wurden kristalline Gesteinsproben hinsichtlich ihrer Permeabilität im Temperaturbereich von 25-250°C untersucht. Hierbei handelte es sich um intakte, also nicht geklüftete Proben. Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit steigender Temperatur die Permeabilität der Proben deutlich verringert (Abb. 3.17). Dieser Trend hält bis etwa 150°C an. In diesem Temperaturbereich durchlaufen die Regressionskurven der Versuche (Polynome 2. Grades) ein Minimum, d. h. bei Überschreiten dieser Temperatur nimmt die Permeabilität wieder signifikant zu. Die Autoren führen als Ursache den Prozess der „Differential Thermal Expansion“ (DTE) an. Die verschiedenen Minerale, aus denen die Proben zusammengesetzt sind, haben unterschiedliche thermische Expansionskoeffizienten, d. h. die Minerale dehnen sich unterschiedlich stark aus.

Dies führt zunächst dazu, dass der intergranulare Porenraum zwischen den Mineralen durch Expansion der Minerale verringert wird, was sich durch eine Verringerung der Permeabilität bemerkbar macht. Durch die unterschiedlich starke Expansion der verschiedenen Minerale entstehen bei voranschreitender Temperaturerhöhung und damit Expansion Spannungen, die schließlich zum Aufreißen von Mikrorissen vor allem an den Kontaktflächen der Minerale führen und somit eine Erhöhung der Permeabilität bewirken.

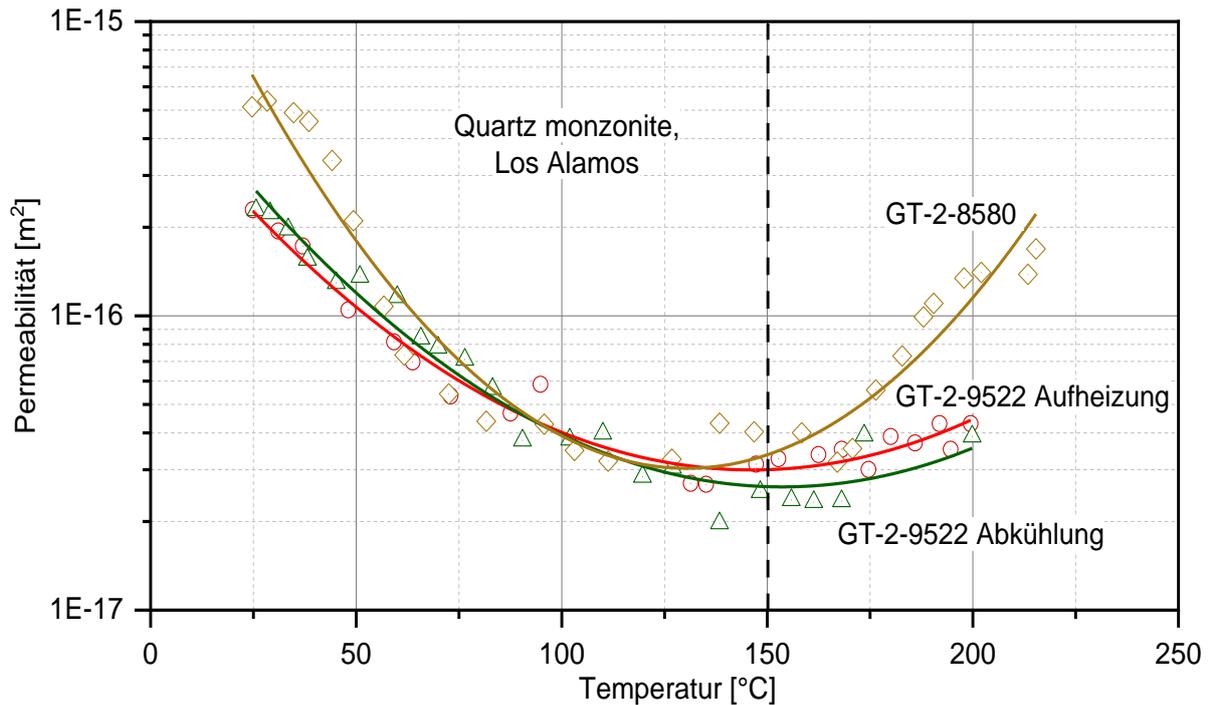


Abb. 3.17: Permeabilität von Quarz-Monzonit Gesteinsproben bei steigenden Temperatur im Bereich von 25-250°C (gezeichnet nach Werten aus Potter 1978)

### 3.4.2.1.2 Kluftweite

Untersuchungen hinsichtlich einer Veränderung hydraulisch wirksamer Kluftweiten unter Temperatureinfluss sind in Yasuhara et al. (2011) dokumentiert. Darin wurden eine Reihe von Durchströmungsexperimenten an geklüfteten Granitproben im Temperaturbereich von 25-90°C durchgeführt. Die Versuche fanden unter einem einschließenden Druck von 5-10 MPa und Strömungs-Differenzdrücken von 0,04-0,5 MPa statt. Die Versuche wurden über einen Zeitraum von einigen hundert Stunden durchgeführt. Ergebnisse dieser Versuche sind beispielhaft in Abb. 3.18 dargestellt. Bei den zwei dargestellten Versuchsergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass bei Steigerung der Temperatur von 25°C auf 90°C (Beginn des grauen Bereiches) die hydraulisch wirksame Kluftweite reduziert wird. Eine Ursache wird darin gesehen, dass sich die Kinetik der Lösungs- und Ausfällungsprozesse temperaturbedingt verändert. Eine später durchgeführte Druckerhöhung führte zwischenzeitlich zu einer leichten Erhöhung der Kluftweite, der temperaturbedingte Trend der Abnahme der Kluftweite bleibt aber auch danach erhalten.

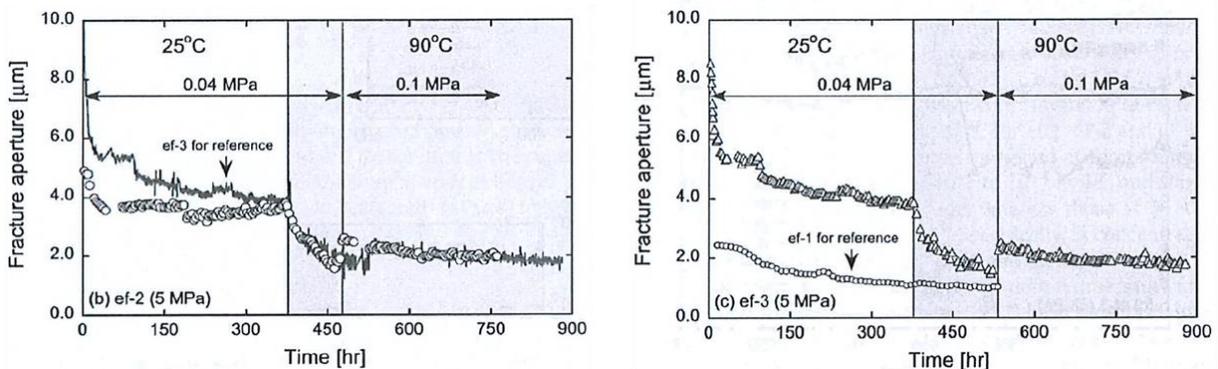


Abb. 3.18: Veränderung der hydraulisch wirksamen Kluftweite als Funktion von Druck und Temperatur (Yasuhara et al. 2011)

Ein ähnliches Verhalten wird auch in der Arbeit von Rutquist (2014) aufgezeigt, in der auf einen Erhitzerversuch im geklüfteten Tuff in Yucca Mountain Bezug genommen wird (Zimmermann et al. 1985). Darin wurde anhand von Durchströmungsversuchen vor und nach einer Erhitzung des Gesteins festgestellt, dass die hydraulisch wirksame Kluftweite sich nach einer Erhitzung von 20°C auf 100°C signifikant reduziert hat (Abb. 3.19, links).

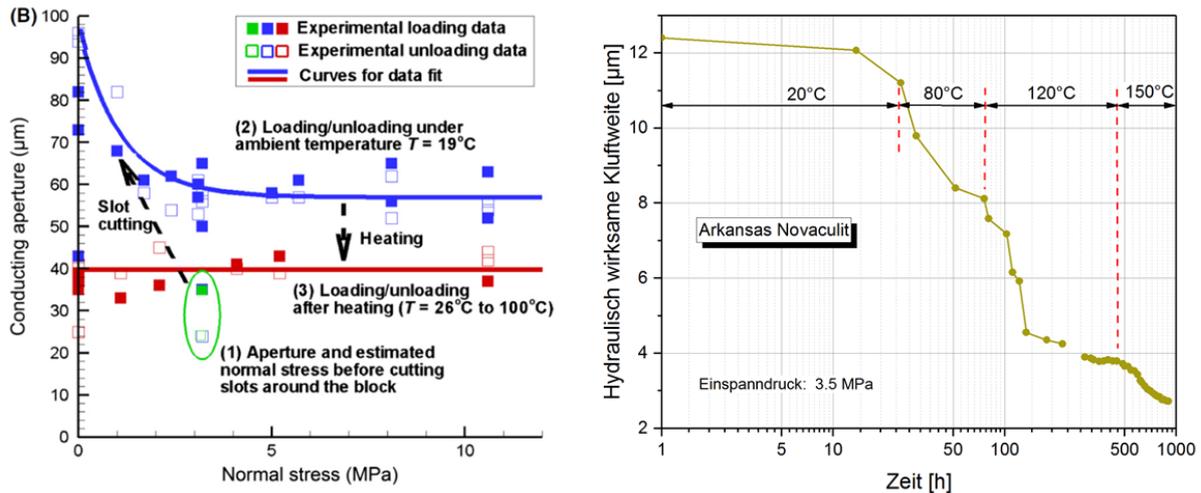


Abb. 3.19: Links: Veränderung der hydraulisch wirksamen Kluftweite als Funktion des Druckes und der Temperatur (Rutquist 2014, Zimmermann et al. 1985). Rechts: Veränderung der hydraulisch wirksamen Kluftweite bei steigender Temperatur bei einer Versuchsdauer von 900 h (neu gezeichnet gemäß Polak et al. 2003)

In einer Arbeit von Polak et al. (2003) wurde eine geklüftete Gesteinsprobe eines kristallinen Gesteins (Arkansas Novaculit) untersucht. Ziel war es, das Permeationsverhalten der Kluft bei verschiedenen Temperaturen zu beobachten. Dazu wurde die Probe mit einem Druck von 3,5 MPa eingespannt und mit einer Fließrate von 0,225-0,9 ml/min durchströmt. Der Versuch wurde bei 4 Temperaturstufen mit steigender Versuchsdauer durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 3.19 (rechts) dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass sich mit jeder Temperaturerhöhung die hydraulisch wirksame Kluftweite signifikant reduziert. Über die gesamte Versuchsdauer von 900 Stunden wurde die hydraulisch wirksame Kluftweite um etwa 80% reduziert. Der größte Teil der Kluftweitenreduzierung erfolgte in der 120°C-Periode. Legt man das ‚Cubic Law‘ für Durchflussberechnungen in einer Kluft zugrunde, in der die Kluftweite zur 3-ten Potenz eingeht, so bedeutet das eine Verringerung der Permeabilität von mindestens zwei Größenordnungen. Als wesentliche Ursache werden chemische Auflösungsprozesse von Oberflächenunebenheiten, speziell von Quarzmineralen, auf der Kluftfläche angegeben wodurch ein Schließen der Kluft ermöglicht wird.

Vergleichbare Erkenntnisse können der Arbeit von Dwivedi et al. (2008) entnommen werden, nur dass hier nicht das Verhalten einer Kluft untersucht wurde, sondern Proben, die mit Mikrorissen durchzogen waren. In der Arbeit wird das temperaturbedingte Öffnen und Schließen von Mikrorissen mittels elektronen-mikroskopischer Aufnahmen (SEM) ausgewertet. Als Probenmaterial wurde indischer Granit gewählt. Die Versuche wurden auf Temperaturstufen von 30, 60, 100, 125 und 160°C durchgeführt. Die in Abb. 3.20 dargestellten Ergebnisse werden dahingehend interpretiert, dass bis 60°C von einer Aufweitung von Mikrorissen ausgegangen wird und dass bei der anschließenden weiteren Temperaturerhöhung die Mikrorisse mehr und mehr geschlossen werden. Eine Entstehung von neuen Mikrorissen wurde bis zur höchsten Temperaturstufe (160°C) bei keiner der Proben festgestellt.

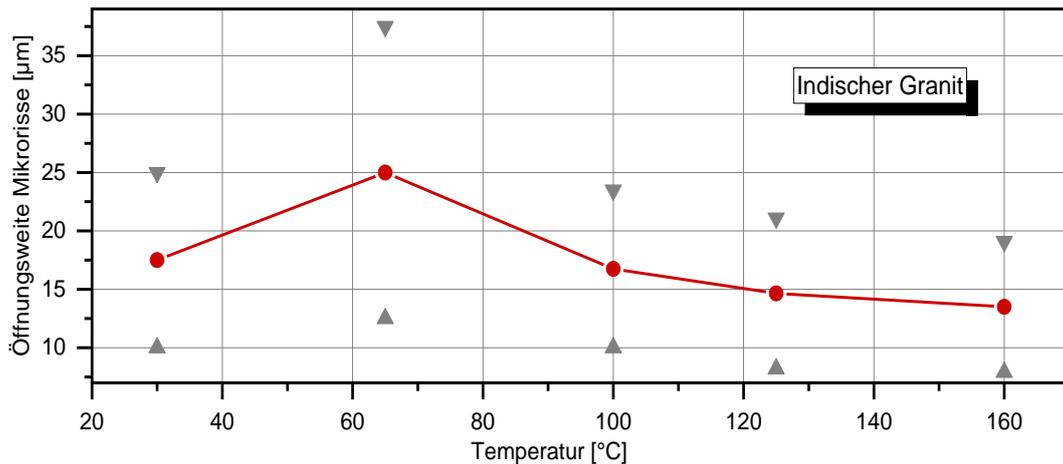


Abb. 3.20: Veränderung der Öffnungsweite von Mikrorissen in Abhängigkeit von der Temperatur. Gezeichnet anhand von Werten aus Dwivedi et al. (2008)

### 3.4.2.2 Mechanische Eigenschaften

#### 3.4.2.2.1 Schwellwerte für Mikro- und Makrorissentstehung

Im Zuge der Definition und Quantifizierung des Riss-Kriteriums wurden verschiedene Schwellwerte für Spannungen diskutiert, die insbesondere den Bereich des subkritischen Risswachstums eingrenzen. Diese Schwellwerte zeigen eine, wenn auch nur geringe, Temperaturabhängigkeit. In einer neueren Arbeit von Kumari et al. (2017) wurden Laborversuche an Australischem Strathbogie-Granit hinsichtlich ihres mechanische Verhaltens bei verschiedenen Einspanndrücken und Temperaturen durchgeführt. Es handelte sich dabei um Triaxial-Versuche mit radialen Einspanndrücken von 10, 30, 60 und 90 MPa und einaxialer Belastungssteigerung bei Temperaturstufen von 20, 100, 200 und 300°C. Die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_{cf}$  sowie die Schwellwerte  $\sigma_{cc}$ ,  $\sigma_{ci}$  und  $\sigma_{cd}$  erhöhen sich erwartungsgemäß mit zunehmender Einspannung und liegen je nach Einspannung im Bereich von 186-510 MPa. Ergebnisse sind in Abb. 3.21 dargestellt.

Die Einwirkungen der Temperatur wurden anhand von Beobachtungen des Risswachstums mittels akustischer Emissionsanalysen (AE) untersucht. Die damit einhergehenden mikrostrukturellen Veränderungen wurden mittels elektronen-mikroskopischer Aufnahmen (SEM) ausgewertet. Anhand der Abb. 3.21 lässt sich erkennen, dass der Bereich des subkritischen Risswachstums mit zunehmender Temperatur zunächst größer wird, bevor sich dieser Trend oberhalb von 200°C umkehrt und er wieder kleiner wird. Mit Blick auf die Quantifizierung des Riss-Kriteriums ist die Schädigungsgrenze von besonderem Interesse (rote Dreiecke in Abb. 3.21a). Diese zeigt insgesamt eine nur geringe Temperaturabhängigkeit unabhängig vom Einspanndruck. Diese Feststellung wird auch in der Arbeit von Shao et al. (2015) bestätigt.

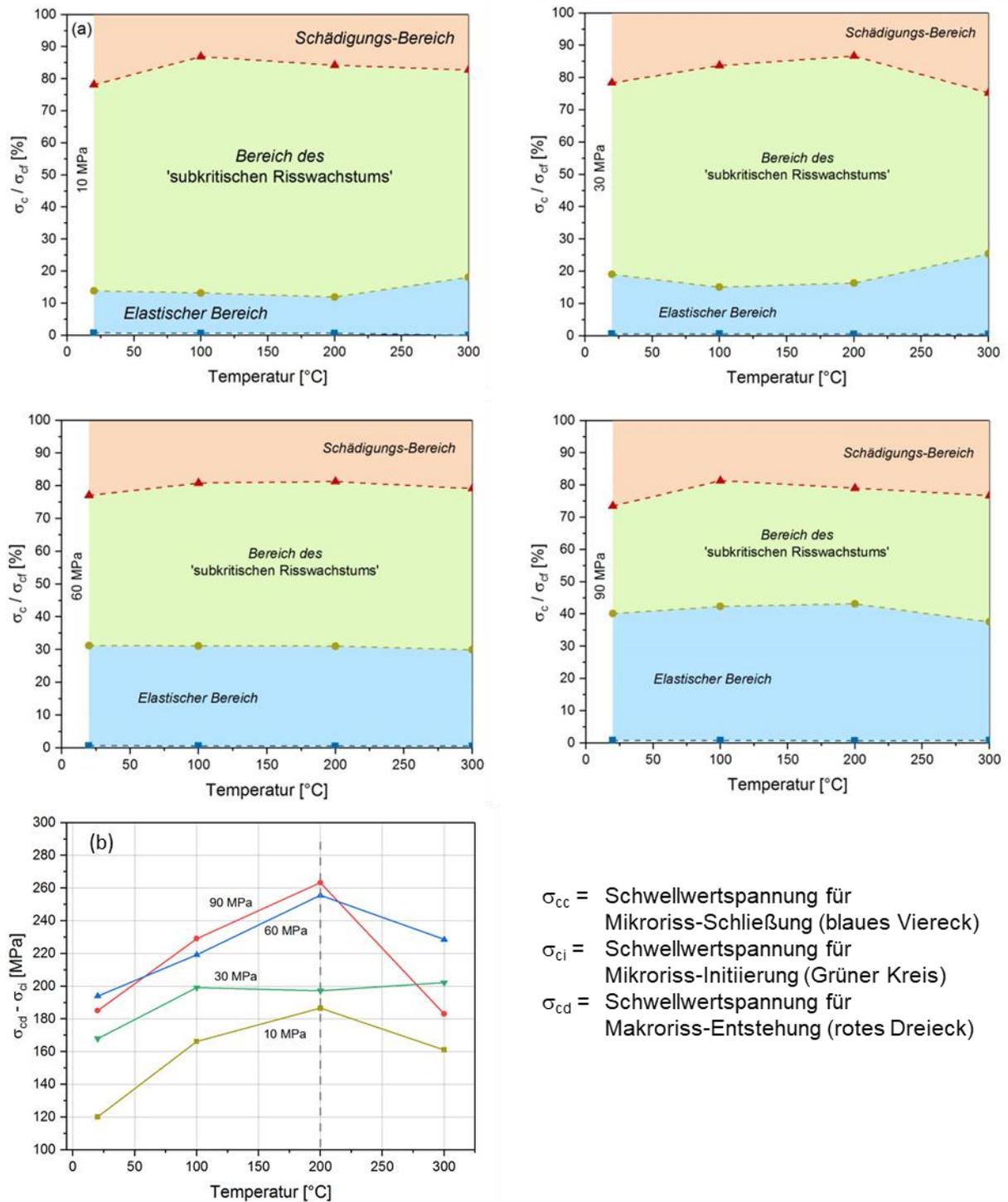


Abb. 3.21: (a): Verhältnis der Schwellwertspannungen zur einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_{cd}$  des Australischen Strathbogie-Granit gemessen als Funktion der Temperatur bei vier verschiedenen radialen Einspanndrücken.  
 (b): Größe des subkritischen Spannungsbereiches als Funktion der Temperatur bei vier Einspanndrücken (gezeichnet nach Werten aus Kumari et al. 2017)

### 3.4.2.2.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit kristalliner Gesteine in Abhängigkeit von der Temperatur wurde in verschiedenen Arbeiten unterschiedlicher Autoren untersucht. Wang & Konietzky (2019) beispiels-

weise geben in ihrer Arbeit eine Übersicht über temperaturabhängige Eigenschaften granitischer Gesteine. Unter anderem ist darin auch für einen nicht näher spezifizierten Granit die gemessene einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.22(a) wiedergegeben.

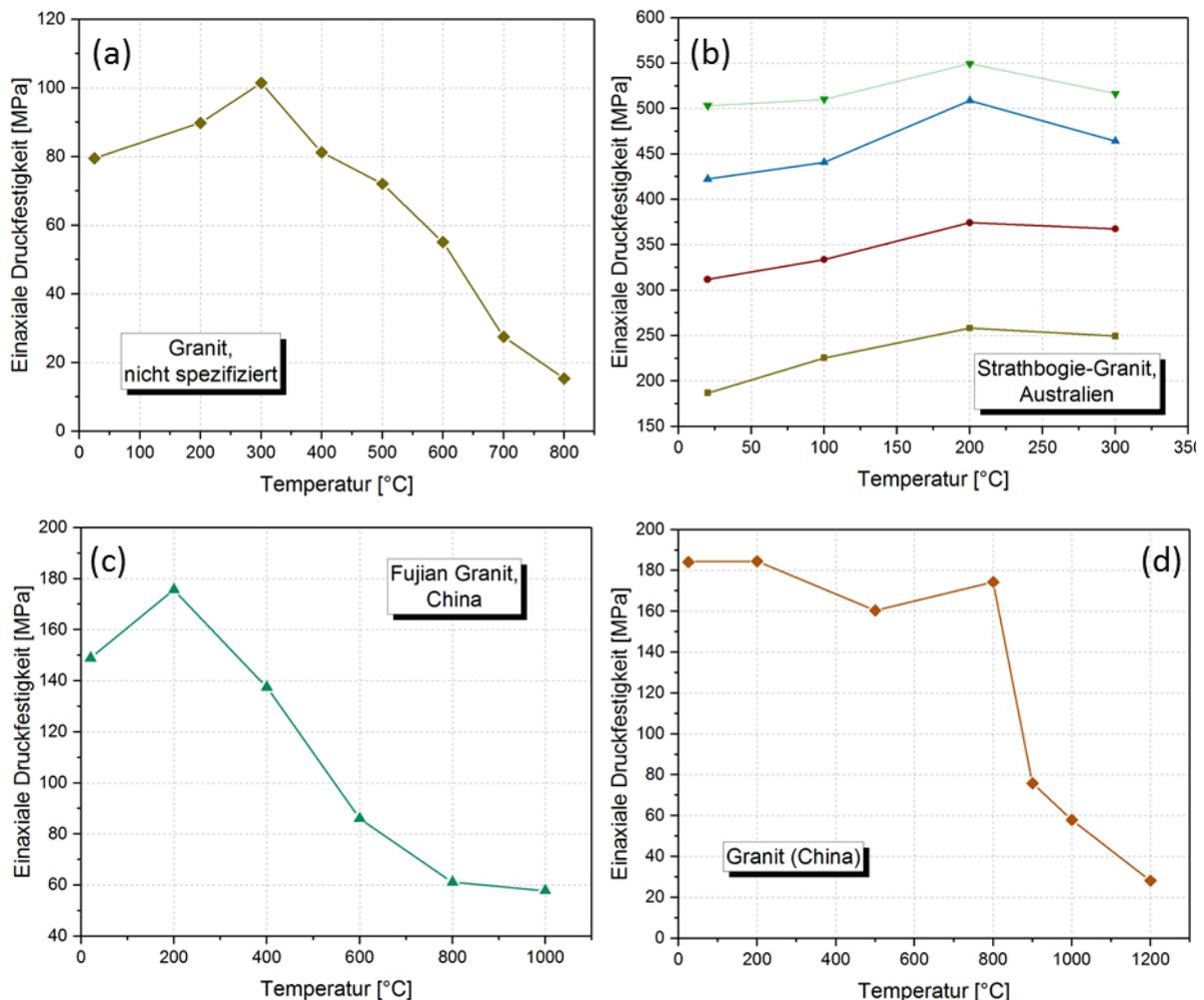


Abb. 3.22: Gemessene einaxiale Druckfestigkeiten verschiedener Granite; (a) Granit gemäß Wang & Konietzky (2019), (b) Strathbogie Granit, Australien, gemäß Kumari et al. (2017), (c) Fujian Granit, China, gemäß Chen et al. (2017) und (d) Granit aus China gemäß Xu et al. (2008)

Demnach erhöht sich die Druckfestigkeit zunächst mit steigender Temperatur bis etwa 200°C. Danach kehrt sich das Verhalten um und die Druckfestigkeit verringert sich stetig bis zum Ende der Messung bei 800°C. Der Grund für die anfängliche Zunahme ist der, dass sich die einzelnen Minerale durch thermische Expansion immer stärker gegeneinander verspannen. Durch diese Verspannung wird die Festigkeit insgesamt erhöht. Erst ab einem bestimmten Temperaturniveau, wenn die Spannung zu groß wird, kommt es zu einem Abriss an den Korngrenzen was insgesamt mit einer Verringerung der Gesteinsfestigkeit einhergeht. Diese Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse früherer Untersuchungen. Kumari et al. (2017) zeigen vergleichbare Ergebnisse für australischen Strathbogie Granit (Abb. 3.22(b)). Auch hier ist der Wendepunkt bei etwa 200°C dokumentiert. Auch die Ergebnisse chinesischer Autoren zeigen prinzipiell das gleiche Ergebnis (Abb. 3.22(c,d)).

### 3.4.2.2.3 Zugfestigkeit

In der Übersichtsarbeit von Wang & Konietzky (2019) sind eine Reihe von Untersuchungsergebnissen bezüglich der Abhängigkeit der Zugfestigkeit kristalliner Gesteine von der Temperatur zusammengestellt (Abb. 3.23). Generell zeigt sich eine Abnahme der Zugfestigkeit mit der Temperatur. Im Temperaturintervall bis etwa 150°C ist die Abnahme zunächst gering, verstärkt sich aber mit weiter zunehmender Temperatur. Insbesondere im Bereich der Umwandlungstemperatur von Quarz bei 573°C erfolgt eine signifikante Reduzierung der Festigkeit.

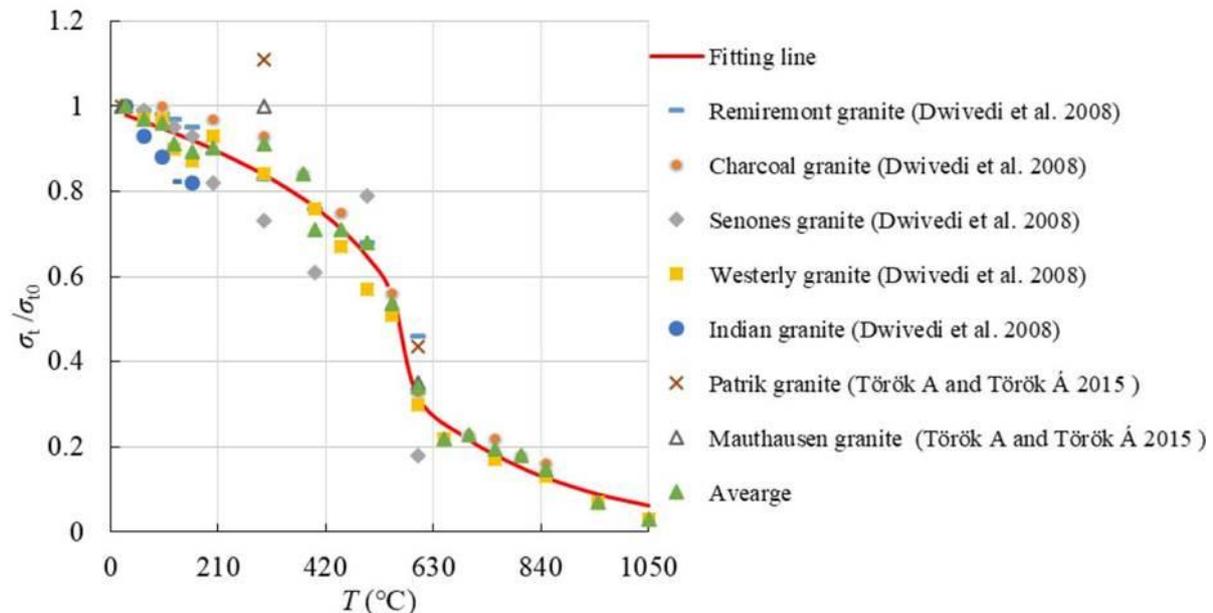


Abb. 3.23: Normierte Zugfestigkeiten kristalliner Gesteine in Abhängigkeit von der Temperatur; Bild und Zitate aus Wang & Konietzky (2019)

### 3.4.2.2.4 E-Modul

Die elastischen Eigenschaften von Granit wurden unter anderem in einer Arbeit von Dwivedi et al. (2008) an fünf Proben (Indischer Granit) im Temperaturbereich von 30°C (Raumtemperatur) bis 160°C untersucht. Die Ergebnisse zeigt Abb. 3.24. Dargestellt sind die Mittelwerte aus Messungen an den 5 Proben auf dem jeweiligen Temperaturniveau. Die eingezeichneten Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar. Nach einer anfänglichen Verringerung erhöht sich das E-Modul oberhalb von 60°C stetig bis zum Ende der Messungen bei 160°C.

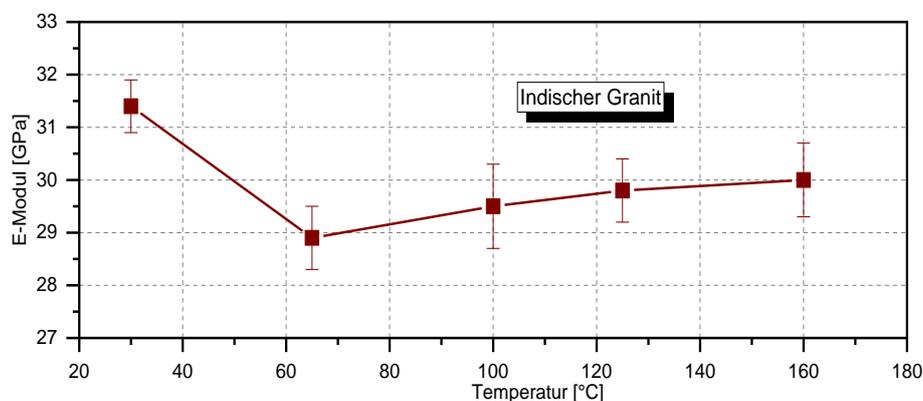


Abb. 3.24: Das E-Modul von Indischem Granit in Abhängigkeit von der Temperatur. Mittelwerte aus jeweils 5 Proben inklusive Standardabweichung (Dwivedi et al. 2008)

Die Ursache für das beobachtete Verhalten ist darin zu sehen, dass in der Anfangsphase zunächst vorhandene Mikrorisse oder Porenräume in den Kontaktflächen einzelner Minerale durch die thermische Expansion der Minerale geschlossen werden. Sind diese Porenräume geschlossen, erfolgt mit weiterer Temperaturerhöhung und damit thermischer Expansion der Minerale eine Verspannung der Minerale untereinander wodurch Belastungen insgesamt besser elastisch abgefangen werden können.

### 3.4.2.3 Thermische Eigenschaften

Bei den thermischen Eigenschaften der Gesteine wird neben der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität auch der thermische Ausdehnungskoeffizient als Kopplungsparameter zwischen der thermischen und der mechanischen Prozessklasse betrachtet.

Die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen ist bekanntermaßen abhängig von der Temperatur dergestalt, dass bei steigender Temperatur die Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Je nach Gesteinsart ist diese Abnahme mehr oder weniger stark ausgeprägt. Für kristalline Gesteine wurde von Heuze (1983) ein empirisch ermitteltes Gesetz für diese Abnahme bis zu einer Temperatur von 300°C formuliert. Die Formulierung beruht auf Messergebnissen an 7 verschiedenen Graniten. In Wang & Konietzky (2019) wurde diese Formulierung durch Berücksichtigung weiterer Messungen leicht abgeändert und bis auf 1000°C ausgedehnt (Abb. 3.25 links). Ebenfalls in der Arbeit von Wang & Konietzky (2019) wurde eine Formulierung für die Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von der Temperatur formuliert, die auf verschiedenen publizierten Messergebnissen basiert. Die spezifische Wärmekapazität von Gesteinen nimmt generell linear mit der Temperatur zu. Allerdings zeigt sich bei diesen Gesteinen aufgrund des Quarzgehaltes eine Unstetigkeitsstelle bei der Umwandlungstemperatur von Quarz ( $\alpha$ - $\beta$ , 573°C). Hier verringert sich die spezifische Wärmekapazität sprunghaft um anschließend wieder linear anzusteigen, allerdings mit einer verringerten Steigung (Abb. 3.25 rechts).

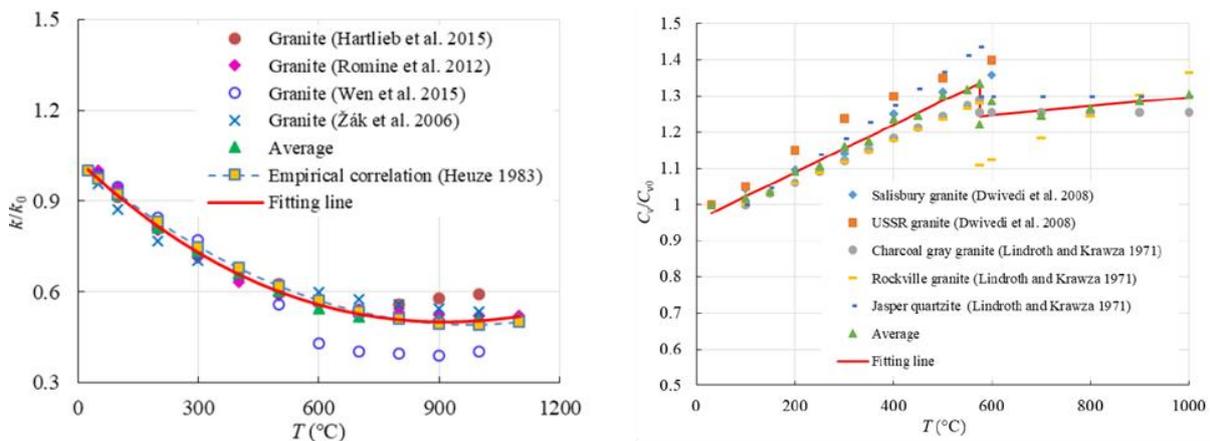


Abb. 3.25: Normierte Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität kristalliner Gesteine in Abhängigkeit von der Temperatur (Bilder und Zitate aus Wang & Konietzky 2019)

Der thermische Expansionskoeffizient der Gesteine bzw. der Minerale ist auch keine konstante Größe, sondern erhöht sich ebenfalls mit steigender Temperatur. Auch für diesen Parameter wurde von Wang & Konietzky (2019) eine Zusammenstellung verschiedener aus der Literatur bekannter Messergebnisse in normierter Form durchgeführt. Die normierte Zusammenstellung ist in Abb. 3.26 gezeigt.

Die Vergrößerung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten erfolgt im Temperaturbereich von 20-300°C zunächst linear. Bei weiterer Temperaturerhöhung verändert sich dieser Trend langsam zu einem exponentiellen Anwachsen bis die Umwandlungstemperatur von Quarz (573°C) erreicht ist.

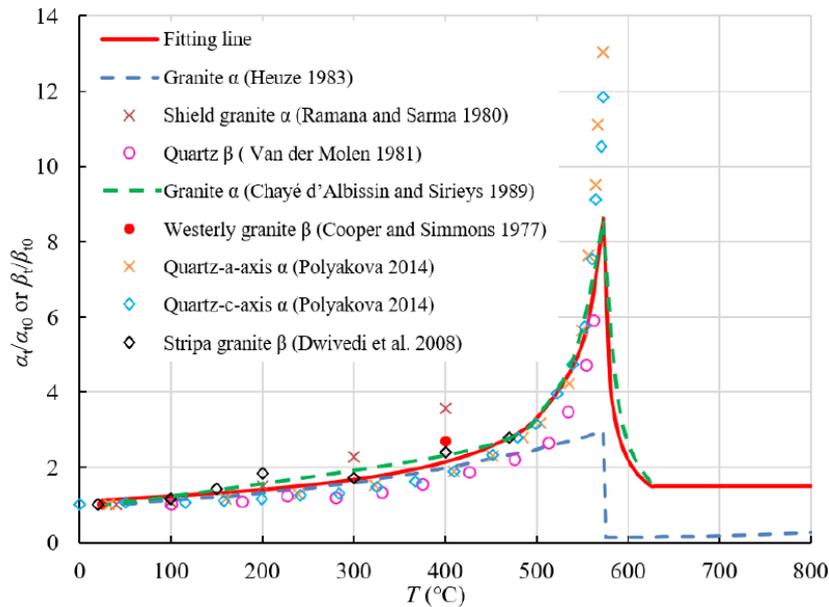


Abb. 3.26: Normierter thermischer Ausdehnungskoeffizient kristalliner Gesteine in Abhängigkeit von der Temperatur;  $\alpha$ -linear,  $\beta$ -volumetrisch; Bild und Zitate aus Wang & Konietzky (2019)

### 3.4.2.4 Chemische Aspekte

Unter den chemischen Aspekten werden zum einen die Sorption und zum anderen die thermochemische-Sulfatreduktion betrachtet.

#### 3.4.2.4.1 Sorption

Der Transport durch die Geosphäre wird für viele Radionuklide durch Sorption an Oberflächen vorhandener Mineralphasen, die durch die geochemischen Bedingungen bestimmt wird und zeitlich und räumlich erheblich variieren kann, verlangsamt. In bisher verwendeten Transportprogrammen ist es eine gängige Methode die Rückhaltung der Radionuklide über zeitlich und räumlich konstante sogenannte Verteilungskoeffizienten ( $K_d$ -Werte) zu beschreiben. Das  $K_d$ -Konzept basiert auf der Annahme, dass bei geringen Elementkonzentrationen und Vorliegen eines Gleichgewichts das Verhältnis zwischen der Konzentration des am Gestein adsorbierten Radionuklids und der in Lösung vorliegenden Radionuklidkonzentration konstant, d. h., unabhängig von der Konzentration ist. Dieses Verhältnis wird als  $K_d$ -Wert bezeichnet (Kühle et al. 1996).

$$K_d = \frac{c_{ad}}{c_{Lsg}} \quad (3.13)$$

mit

$c_{ad}$  = Konzentration des am Gestein adsorbierten Radionuklids [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ]  
 $c_{Lsg}$  = Konzentration des Radionuklids in Lösung [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

Der mobile Anteil  $a$  eines Radionuklids steht mit dem  $K_d$ -Wert in folgender Beziehung:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{1-n}{n} \cdot \rho \cdot K_d} \quad (3.14)$$

wobei

$a$	=	mobiler Anteil eines Radionuklids
$\rho$	=	Gesteinsdichte [kg m <sup>-3</sup> ]
$n$	=	Porosität

Der mobile Anteil entspricht genau dem reziproken Retardationsfaktor  $R$ , der die Verzögerung eines Radionuklides gegenüber dem Fluid beschreibt (Kinzelbach 1992) und direkt in der Transportgleichung (lineare partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung) erscheint.

$$R = 1 + \frac{1-n}{n} \cdot \rho \cdot K_d \quad (3.15)$$

Es besteht Grund zu der Annahme, dass dieser Verteilungskoeffizient auch eine relevante Abhängigkeit von der Temperatur besitzt. In der Arbeit von Konevnik et al. (2017) wurde eine zwei- bis fünffache Erhöhung der Verteilungskoeffizienten  $K_d$  für Strontium (Sr) und Uran (U) an Gneis und Dolerit bei einer Temperaturzunahme von 20°C auf 90°C beobachtet. Als mutmaßlicher Grund für diese Erhöhung wurde eine Verschiebung des Ladungsnullpunktes der Minerale zu niedrigeren Werten vorgeschlagen, wobei keine entsprechende Messung erfolgte.

#### 3.4.2.4.2 Thermochemische Sulfatreduktion

Bei der thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) handelt es sich um einen Prozess, bei dem unter Nutzung von Wasserstoffatomen eines Reduktionsmittels Sulfat reduziert wird und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) und Wasser entstehen. Die TSR setzt voraus, dass gelöstes Sulfat, welches in geologischen Formationen überwiegend aus der Auflösung von Gips und Anhydrit stammt, vorliegt (Machel 2001). Als eine weitere Quelle für Sulfat dient die Oxidation der Sulfide (Pyrit, Chalkopyrit) durch den Kontakt mit meteorischen Wässern in den hydraulisch zugänglichen Klüften, die z. B. Sulfatkonzentrationen im Bereich 325 bis 1060 mg/l verursachen kann (Isherwood et al. 1982, Stober et al. 2016).

Als Reduktionsmittel können bei der TSR entweder organische Verbindungen oder H<sub>2</sub> dienen, so dass im ersteren Fall H<sub>2</sub>S und CO<sub>2</sub> und im letzterem Fall nur H<sub>2</sub>S als Reaktionsprodukte entstehen (Truche et al. 2014). Als Beispiel sei folgende Reaktionsgleichung gegeben:



Die niedrigste abgesicherte Temperatur für das Einsetzen der TSR wird in Machel (2001) mit 127°C angegeben, während Nachweise ihres Auftretens bei Temperaturen ab etwa 100°C von (Machel 2001) als fraglich angesehen werden. Unter bestimmten Bedingungen sind für das Einsetzen von der TSR sogar die Temperaturen von 160 bis 180°C notwendig (Machel 2001). Das hat damit zu tun, dass das Zustandekommen der TSR von der Zusammensetzung von Kohlenwasserstoffen, den Konzentrationen von H<sub>2</sub>S, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> und S<sub>3</sub><sup>-</sup>, labilen organischen Schwefelverbindungen, Gesteinsgefüge und -mineralogie, In-situ-Temperatur, Wassergehalt, Salinität und pH abhängt (Xiao et al. 2018). So wird z. B. in Truche et al. (2014) und Barré et al. (2017) argumentiert, dass S<sub>3</sub><sup>-</sup> für einen effizienten Ablauf der TSR benötigt wird. Die niedrigste Temperatur, bei der S<sub>3</sub><sup>-</sup> in einer aquatischen Lösung beobachtet wurde, beträgt 100°C, daher wird diese Temperaturgrenze in (Truche et al. 2014) und (Barré et al. 2017) mit der unteren Temperaturgrenze für die TSR gleichgesetzt.

Des Weiteren stellten zweimonatige Versuche mit Methan als Reduktionsmittel bei 300°C fest, dass keine TSR in Abwesenheit von H<sub>2</sub>S zustande kommen kann (Truche et al. 2014). Die letzte Studie liefert zudem einen Nachweis dafür, dass sich die TSR bei einer Erhöhung der gesamten Schwefelkonzentration (Sulfat + Sulfid) von <0,1 M auf >0,1 M um etwa zwei Größenordnungen erhöht. Außerdem kann molekularer Wasserstoff die TSR um den Faktor 2–3 bei pH unter 2 beschleunigen (Truche et al. 2009).

Auf der Grundlage von Laborexperimenten bei 280–350°C wurde extrapoliert, dass durch TSR die Hälfte des Sulfats zu H<sub>2</sub>S innerhalb von ca. 1.650 Jahren bei 150°C und ca. 372.000 Jahren bei 100°C umgewandelt wird (Cross 2004). Machel (2001) gibt anhand der Laborexperimente bei 175–250°C hingegen mit 700–7000 Jahren eine deutlich geringere Halbwertszeit für die Sulfat-Umsetzung zu Sulfid bei 100°C an. Der Unterschied in diesen Voraussagen kann wie oben diskutiert durchaus dem Unterschied der Zusammensetzungen der reagierenden Stoffe in den beiden Experimenten zuzuschreiben sein.

Silikate und Alumosilikate (Montmorillonit, Illit und Quarz) beschleunigen und Karbonate (Calcit und Dolomit) verlangsamen die TSR (Xiao et al. 2018). Als eine Erklärung für diese Beobachtung wurde der entgegengesetzte Einfluss dieser Minerale auf pH der Lösung vorgeschlagen. Silikate und Alumosilikate setzen aufgrund ihrer Auflösung – und im Fall von Montmorillonit auch aufgrund einer Reaktion mit austauschbaren Kationen – Protone frei, während die Auflösung von Calcit und Dolomit diese konsumiert. Der beschleunigende Einfluss des sinkenden pH auf die TSR wird der steigenden Produktion des Hydrogensulfat-Anions (HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>) als eine entscheidende Vorstufe der TSR zugeschrieben (Xiao et al. 2018). Trotz der verlangsamenden Wirkung der Karbonate auf die TSR werden Karbonat-Formationen mit assoziiertem Anhydrit als optimale geologische Standorte für TSR angesehen (Machel 2001).

Die TSR kann entweder exotherm oder endotherm ablaufen (Machel 2001), so dass eine Temperaturerhöhung um bis zu 20°C am Reaktionsort nicht ausgeschlossen werden kann (Machel 2001). Das Volumen der gasförmigen Produkte (H<sub>2</sub>S, falls nicht gelöst, und ggf. CO<sub>2</sub>) der TSR übersteigt deutlich das Volumen der während der Reaktion zersetzten CaSO<sub>4</sub> und CaCO<sub>3</sub>, so dass der Fluiddruck am Reaktionsort deutlich ansteigen kann (Machel 2001).

### 3.4.2.5 Mineralogische Aspekte

Unter mineralogischen Aspekten werden Prozesse betrachtet, die zu Umwandlungen der Minerale des Wirtsgesteins führen.

#### 3.4.2.5.1 Hydrothermale Alterationsprozesse für Kristallingestein-bildende Minerale

Im Folgenden werden hydrothermale Alterationsprozesse für Granit-, Diorit- und Gneis-bildende Minerale (Na,Ca)-Feldspat (Plagioklase mit Endgliedern Albit und Anorthit), (K,Na)-Feldspat (Alkalifeldspäte mit Endgliedern Orthoklas/Mikroklin und Albit), Biotit, Quarz und Amphibole (z. B. Hornblende) beschrieben.

Eine thermische Behandlung von einer Granitprobe in einem Ofen bei 400°C, 750°C und 1100°C für einige Stunden rief kaum Mineralveränderungen der Hauptkomponenten Feldspat und Quarz und eine vollständige Umwandlung des Glimmers ab 750°C hervor (Saiang & Misovsky 2012). Wie im Folgenden erläutert, treten beim Vorhandensein einer Lösung allerdings bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen deutliche Veränderungen der mineralogischen Zusammensetzung auf.

Albitisierung von Plagioklasen und Alkalifeldspäten ist eine der häufigsten und charakteristischen hydrothermalen Alterationsreaktion der oberen Erdkruste und ist ausreichend schnell, um sogar im Labor untersucht zu werden (Plümpner & Putnis 2009). In granitischen Gesteinen in Simpevarp und Laxemar in Schweden wurde eine progressive Alteration von Mikroklin zu Oligoklas und dann Oligoklas zu Albit nachgewiesen (Plümpner & Putnis 2009). Da das Molarvolumen von Oligoklas um 8 % geringer ist als das Molarvolumen von Mikroklin, wird bei der ersteren Reaktion Porosität generiert. In den so entstandenen Mikrometer-großen Poren bildet sich bei der letzteren Reaktion feinkörniger Muskovit (Serizit). Bildung von Serizit wird als eines der häufigsten Produkte der hydrothermalen Alteration von Graniten betrachtet (Plümpner & Putnis 2009). Die Transformation von Oligoklas zu Albit fand in granitischen Gesteinen in Simpevarp und Laxemar entlang von intragranularen Mikrorissen statt und verdeutlicht die Bedeutung dieses Fluid-Infiltrationspfades für den Ablauf der Alteration. Die Albitisierung wurde durch eine Transformation von Biotit zu Chlorit und eine Zersetzung von Hornblende mit einer vermutlichen Fe-Freisetzung begleitet. Zu einem späteren Zeitpunkt führte eine Klufthildung in den so alterierten granitischen Gesteinen zu einem Abfall vom lithostatischen zum hydrostatischen Druck, der eine Kalifeldspat-Bildung aus Serizit und Quarz sowie eine Hämatit-Präzipitation begünstigte (Plümpner & Putnis 2009).

Auf sehr ähnliche Weise infiltrierte das 320–350°C heiße hydrothermale Fluid aus Klüften im Naegi–Agematsu Granit in Japan durch Mikrorisse in die Gesteinsmatrix, was zu einer teilweisen Auflösung von Plagioklasen und einer teilweisen Transformation von Biotit zu Chlorit führte (Nishimoto & Yoshida 2010). In den dadurch entstandenen Poren wurde Biotit aufgelöst und Fe-Phyllosilikate (Chlorit, Corrensit und Smektit) präzipitierten unter reduzierenden Bedingungen. Anschließend lösten sich Kalifeldspat und Fe-Phyllosilikate auf und es erfolgte eine Präzipitation von Illit und Quarz, die zu einer weiteren Mikroriss-Bildung führte. Weder eine Bildung von Kaolinit, die auf saure Bedingungen im hydrothermalen Fluid hinweisen würde, noch eine Bildung von Calcit, die unter alkalischen Bedingungen stattfindet, wurden beobachtet. Die auf diese Weise entstandenen mit Illit verfüllten Klüfte blieben bei Temperaturen von unter 200°C seit etwa 60 Millionen Jahre stabil (Nishimoto & Yoshida 2010).

Ein Illit mit einer Symmetrie von 2M1 bildet sich in Granit in der Regel bei > 280°C aus der hydrothermalen Alteration von Feldspat und Biotit, wohingegen ein 1 Md Illit bei 60-180°C aus der durch eine Scherdeformation begleiteten hydrothermalen Alteration von Kalifeldspat oder aus einer Transformation von 2M1 Illit gebildet werden kann (Niwa et al. 2016). Smektite können sich in Granit bei einer oberflächennahen hydrothermalen Alteration unter etwa 135°C bilden, während Kaolinite bei < 120°C, hohen Fluid/Gestein-Verhältnissen und für meteorische Wässer charakteristischen sauren Bedingungen gebildet werden (Niwa et al. 2016).

Anorthit, das Ca-Endglied der Plagioklase, ist bei einem Kontakt mit hydrothermalen Wässern bei Temperaturen unter 250°C instabil und kann in einer Reaktion unter Quarz-Verbrauch zu einem Ca-Zeolith Laumontit bei 150–250°C und einem Ca-Zeolith Stilbit bei < 120°C alterieren, so dass eine Albitisierung der Plagioklase zustande kommt (Stober & Bucher 2015). Solche Albitisierung und Ca-Zeolith-Bildung konnte bis zu 15 Vol.% an Porosität in geklüfteten Graniten in den Alpen generieren. Ca-Zeolithe waren eines der häufigsten Produkte der hydrothermalen Alteration der alpinen Granite und Gneise im Temperaturbereich < 250°C und mit der abnehmenden Temperatur präzipitierten in der Reihenfolge Skolezit, Laumontit, Heulandit, Chabazit und Stilbit (Weisenberger & Bucher 2010). Die hydrothermale Albitisierung wird in der Regel durch eine teilweise Auflösung von Quarz begleitet (Kaur et al. 2012). Jedoch be-

schreibt diese Studie mit Graniten in Rajasthan, Indien, ein Beispiel, bei dem sowohl die Oligoklas-Albit- als auch die etwas langsamere Mikroklin-Albit-Transformation aufgrund eines Kontaktes mit meteorischen Wässern bei 350–400°C in einer Quarz-Bildung resultierte.

Die hydrothermale Transformation von Biotit zu Chlorit findet in einem breiten Temperaturbereich unterhalb von ca. 400°C statt (Yuguchi et al. 2015). Diese Studie unterscheidet dabei zwischen zwei Mechanismen für Toki Granit in Japan. Bei der Transformation von Biotit zu Chlorit reduziert sich nach dem ersten Mechanismus das Feststoffvolumen um 6-20 % und große Mengen an  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  und  $Mg^{2+}$  werden aus dem hydrothermalen Fluid für die Bildung des Chlorits verbraucht. Nach diesem Mechanismus wurden mehr als 85 % der Chlorite im Toki Granit gebildet. Nach dem zweiten Mechanismus reduziert sich das Feststoffvolumen um 27-63 % und keine oder sehr geringe Mengen an Metallionen werden aus dem hydrothermalen Fluid verbraucht. Für die Dominanz eines der beiden Mechanismen ist nach Yuguchi et al. (2015) die Verfügbarkeit von Metallionen im hydrothermalen Fluid entscheidend. Die entstandene Porosität wird durch Titanit, Ilmenite, K-Feldspat und Fluorit gefüllt. Bei Temperaturen von 350-290°C wurde dort Biotit vollständig durch Chlorit ersetzt, während bei Temperaturen von 350-180°C nur eine teilweise Transformation von Biotit zu Chlorit erfolgte.

Eine hydrothermale Reaktion mit meteorischen Wässern bei Fluid/Gestein-Verhältnissen  $> 0,8$  führte bei einer Abkühlung der Granite im südlichen Schwarzwald von 500°C auf 200°C (bei Drucken von 100-200 MPa) zu einer Biotit-Alteration zu Chlorit im höheren Temperaturbereich und zu Muskovit im niedrigeren Temperaturbereich, während Feldspäte im gesamten Temperaturbereich alteriert wurden (Simon 1990).

Die Untersuchungen von heißen Quellen aus dem geklüfteten Granit der Qilian Gebirge in China weisen auf eine starke hydrothermale Alteration von Biotit, K-Feldspat und Plagioklas bei 130–150°C hin, bei der Biotit vollständig durch Chlorit und Plagioklas (Oligoklas) durch Albit ersetzt wurde (Stober et al. 2016). Des Weiteren wurden Hinweise erhalten, dass Glimmer und Feldspat durch die hydrothermale Alteration zu Tonmineralen (u. A. Saponit, Beidellit, Montmorillonit und Kaolinit) bzw. zu Zeolithen umgewandelt werden. Die Wechselwirkung mit den aufsteigenden und sich dabei abkühlenden Wässern führt bei Temperaturen  $< 130^{\circ}C$  zu einer Anreicherung des Fe im Chlorit und K in Muskovit, die im Letzteren eine Umwandlung zum Alterationsendprodukt Illit vorantreibt (Stober et al. 2016).

Im kristallinen Gestein in Forsmark (Schweden) führte die hydrothermale Alteration in Klüften zur Bildung von (i) Epidot, Chlorit und Quarz bei Temperaturen  $> 150\text{--}200^{\circ}C$  im ältesten dokumentierten Alterationsereignis, (ii) Kalifeldspat, Albit, Prehnit, Laumontit, Calcit und Chlorit bei etwa 200°C, unter oxidierenden (Anwesenheit von Hämatit) und gleichzeitig alkalischen Bedingungen sowie einer niedrigen Salinität und (iii) Quarz und Pyrit bei 60-190°C sowie Calcite bei 60-100°C und einer Salinität von 15-20%, (iv) Tonmineralen, Calcit sowie in geringfügigen Mengen Pyrit und Goethit bei  $< 50^{\circ}C$  (Sandström & Tullborg 2009).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der hydrothermalen Alteration von Granit, Diorit und Gneis zusätzlich zu deren bildenden Mineralen (Na,Ca)-Feldspat, (K,Na)-Feldspat, Biotit, Quarz und Amphibole (z. B. Hornblende) am häufigsten noch folgende Minerale entstehen können: Epidot, Muskovit/Serizit, Chlorit, Illit, Smektit, Kaolinit (saure Bedingungen), Calcit (alkalische Bedingungen), Stilbit, Laumontit, Prehnit, Titanit, Hämatit (oxidierende Bedingungen) und Pyrit (reduzierende Bedingungen). Von diesen Mineralen werden in (Nishimoto & Yoshida 2010) Calcit, Laumontit, Chlorite, Epidot und Prehnite zusammen mit Quarz als die häufigsten Kluffüllungsminerale angegeben.

### 3.4.2.5.2 Alterationsprozesse für Kluft-füllende Minerale

#### Pyrit-Oxidation

Pyrit kann als ein Kluft-füllendes Mineral im Kristallingestein vorhanden sein (Drake et al. 2018b). Eine vermutliche Oxidation von 1–2 Gew.% an Pyrit im Callovo-Oxfordian-Tonstein entsprechend der Reaktion



bei 85°C in einem In-situ-Versuch im Untertagelabor in Bure (Frankreich) verursachte einen Rückgang des pH-Wertes in einem Bohrloch von etwa 8 auf 4,5 innerhalb von 200 Tag (Necib et al. 2016). Die reduzierenden Bedingungen im Versuch wurden nach weiteren 100 Tagen erreicht, so dass der pH sich erst nach weiteren 100 Tagen bei etwa 7,5 stabilisierte. Der In-situ-Versuch wurde allerdings so konzipiert, dass vergleichsweise große Lösungsmengen mit dem gelösten Sauerstoff im Bohrloch – in gewisser Ähnlichkeit zum Französischen Endlagerkonzept mit 13 % des Einlagerungsbohrlochvolumens als Hohlraum um die Abfallbehälter – vorhanden waren. Die Relevanz dieses Effektes bei geringeren vorhandenen Hohlräumen in Klüften ist noch unklar.

#### H<sub>2</sub>-induzierte Pyrit-Reduktion

Bei Temperaturen  $\leq 150^\circ\text{C}$  und H<sub>2</sub>-Partialdrucken unter 3 MPa wird die Hydrogensulfid-Konzentration in der flüssigen und gasförmigen Phase allein durch die Löslichkeit des Pyrits bestimmt. Diese Löslichkeit kann z. B. bei 1–2 Gew.% an Pyrit, einem H<sub>2</sub>-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 (Truche et al. 2013). Bei Temperaturen über 150°C und H<sub>2</sub>-Partialdrucken über 3 MPa hingegen wird Pyrit (FeS<sub>2</sub>) innerhalb kürzester Zeit vollständig in Pyrrhotite (FeS<sub>1+x</sub>) mit gleichzeitiger Freisetzung von (1–x) Molen Hydrogensulfid per Mol Pyrit umgesetzt.

#### Calcit-Zersetzung

Calcit ist mit Gehalten von 0,028-18,8 g Calcit/kg Gestein und einem Mittelwert von 2,52 g/kg allgegenwärtig im granitischen Gestein und kommt in Form von isolierten xenomorphen Kristallen, Kluft- und Hohlraumfüllungen sowie serizitierten Kerne der Plagioklase vor (White et al. 2005). Calcit-Auflösungsraten sind laut dieser Arbeit um sechs Größenordnungen höher als die von Silikatmineralen. Untersuchungen für Sedimentformationen (Coudrain-Ribstein et al. 1998) zeigen, dass bei Temperaturen von bis zu 200°C die partiellen CO<sub>2</sub>-Drücke von bis zu 13 MPa durch die Zersetzung von Calcit und Dolomit in Anwesenheit von einem Mg-Al-Silikat, wie z. B. Chlorit, zusammen mit anderen Silikat- bzw. Tonmineralen (Ceriotti et al. 2017), wie Smektit, Kaolinit, Feldspat oder Quarz, entstehen können. Die Karbonat-Zersetzungsreaktion kommt laut dem aktuellen Stand des Wissens durch die Silikat-Hydrolyse zustande und resultiert in einer CO<sub>2</sub>-Freisetzung, die weit über der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus der Organik liegt (Hutcheon et al. 1990, Hutcheon & Abercrombie 1990, Ceriotti et al. 2017). Diese Reaktion kann nur bei Temperaturen unterhalb 50°C vernachlässigt werden, gewinnt an Bedeutung bei höheren Temperaturen und dominiert über eine mögliche Karbonat-Präzipitation ab etwa 100°C (Smith & Ehrenberg 1989, Ceriotti et al. 2017).

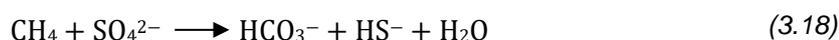
### 3.4.2.6 Mikrobiologische Aspekte

In granitischen Gesteinen werden 10<sup>3</sup> bis 10<sup>7</sup> mikrobielle Zellen pro ml Grundwasser nachgewiesen (Pedersen 1997). Die Mobilisierung des Fe(III) aus Eisen(hydr-)Oxiden zu Fe(II) in Lösungen durch Eisen-reduzierende Bakterien und die Reduktion des Sulfats zu Sulfid durch Sulfat-reduzierende Bakterien treten häufig im tiefen granitischen Untergrund auf. Außerdem sind dort methanogene Archaeen und fermentative Bakterien vertreten (Pedersen 1997).

Wenn ein an Fe(II), Mn(II) und HS<sup>-</sup> reiches Grundwasser eine Sauerstoff-reiche Atmosphäre z. B. in einem bewetterten Tunnel erreicht, entstehen Stoffgradienten, die für die Aktivität von Eisen-, Mangan- und Methan-Oxidierenden Bakterien günstig sind (Pedersen 1997). Die Fe(III)-reduzierenden Mikroben können bis etwa 121°C (Kashefi & Lovley 2004) und methanogene Mikroben bei Temperaturen von bis zu 122°C (Takai et al. 2008) aktiv bleiben, während Sulfat-reduzierende Bakterien ein optimales Wachstum im Temperaturbereich von 80–95°C zeigen (Weber & Jørgensen 2002).

Für granitische Gesteine in Forsmark, Götemar und Laxemar in Schweden wurde nachgewiesen, dass die dort hauptsächlich im Paläozoikum (vor 252 bis 540 Millionen Jahren) erfolgte mikrobielle Sulfatreduktion zur Bildung von Pyrit in größeren Klüftbereichen führte. Da diese Standorte um bis zu 400 km voneinander entfernt sind, wird in (Drake et al. 2018a) vorgeschlagen, dass solche Reaktionen repräsentativ für alle geklüfteten granitischen Gesteine sind.

In einer weiteren Untersuchung der Klüftbereiche im granitischen Gestein in Forsmark wurde die im Paläozoikum stattgefundene Methanogenese im Tiefenbereich 155–406 m nachgewiesen (Drake et al. 2018b). Diese Methanogenese wurde durch Asphalte aus dem zur damaligen Zeit darüber liegenden schwarzen Schiefergestein (*engl.* black shale) induziert. Als Grund für die Zufuhr der Asphalte ins tiefer liegende Klüftsystem wird ein tektonisches Ereignis, das die Temperatur im Schiefergestein erhöhte und Asphalt viskos machte, vermutet (Drake et al. 2018b). Die Wechselwirkung von methanogenen und Sulfat-reduzierenden Mikroben kann auch zur anaeroben Methanoxidierung nach der Reaktion



führen. Die Ergebnisse von Drake et al. (2018b) deuten darauf hin, dass diese Reaktion in Forsmark im Paläozoikum in Tiefenbereichen 396–399 m und (zu einer anderen Zeit) 410–414 m ablief. Die Tiefenänderung dieser Reaktion stimmt mit den Befunden für Olkiluoto (Finnland) überein, wo diese Reaktion gegenwärtig im Tiefenbereich 300–400 m abläuft und früher in geringeren Tiefen abgelaufen ist (Drake et al. 2018b). Diese Reaktion wird als maßgeblich für die Pyrit-Bildung in Klüften der granitischen Gesteine betrachtet (Drake et al. 2018b).

In einer Studie des Äspö Diorits in Schweden wurde in einer verheilten Kluft ein fossilisierter Biofilm nachgewiesen (Heim et al. 2012). Diese Kluft wurde noch im Paläozoikum durch Calcit verheilt, wurde aber im Jungpleistozän (vor 11,7 bis 126 Tausend Jahren) nach der Weichsel-Kaltzeit aufgrund der Schmelzung der Eisüberdeckung und der damit einhergehenden Druckentlastung reaktiviert. Der Eintrag von Schmelz- und Meerwasser resultierte in der Bildung eines 20–100 µm dicken Biofilms. Eine darauffolgende Änderung der Salinität und Alkalinität der Lösung führte zur Bildung des Calcits, der die Kluft wieder verheilte und das Wachstum und die Existenz des Biofilms beendete (Heim et al. 2012).

Diese anaeroben Prozesse werden vermutlich durch H<sub>2</sub> als Energiequelle ermöglicht (Pedersen 1997). Als eine der Quellen von H<sub>2</sub> im tiefen Untergrund wird die radiolytische Produktion von H<sub>2</sub> aus Wasser betrachtet. Primordiale Radionuklide und ihre Zerfalls- und Spaltprodukte sind z. B. für H<sub>2</sub>-Konzentrationen von bis zu 1.500 mmol/L in Wässern, die in einer Tiefe von ca. 3 km im Witwatersrand Basin in Südafrika gesammelt wurden, verantwortlich (Lin et al. 2005). Mikroben können eine um einen Faktor von etwa 325 erhöhte H<sub>2</sub> Bildung induzieren,

wenn exogene Minerale bzw. Gesteine in Kontakt mit mikrobiell besiedelten Sedimentschlämmen bei Temperaturen von 40-100°C mit einem Optimum bei über 70°C kommen (Parkes et al. 2011).

Allerdings korrelieren H<sub>2</sub>-Konzentrationen in manchen granitischen Gesteinen in Schweden weder mit der Tiefe noch mit der Gesteinszusammensetzung noch mit der Residenzzeit des Grundwassers, die in einigen Fällen zu kurz ist, um die beobachteten H<sub>2</sub>-Konzentrationen zu erklären. Die aktuelle Hypothese, die insbesondere auf Funden in Äspö und Olkiluoto basiert, lautet, dass anaerobe Pilze maßgeblich zur H<sub>2</sub>-Produktion in magmatischen Gesteinen beitragen (Drake & Ivarsson 2018). Anaerobe Pilze sind bis zu einer Tiefe von 1 km im Untergrund verbreitet und wurden u. a. in geklüfteten granitischen Gesteinen in Olkiluoto (in einer Tiefe von 300–800 m) und in Äspö (in einer Tiefe von 201–444 m) nachgewiesen (Drake & Ivarsson 2018). Die meisten von diesen anaeroben Pilzen sind aerob auf der Erdoberfläche. Ihr Metabolismus im anoxischen Untergrund ist unbekannt. Die durch Mikroben und Pilze produzierten niedrigmolekularen organischen Säuren können die Alteration von Granit stark beschleunigen (Frey et al. 2010, Brunner et al. 2011).

Eine weitere Eigenschaft sowohl Sulfat- als auch Eisen(III)-reduzierender Bakterien (jedoch nicht der Methan-produzierende Archaeen), die ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber ungünstigen Umgebungsbedingungen erhöht, ist die Bildung von Endosporen (Chi Fru & Athar 2008, Slobodkin et al. 1999). Sie wird durch den Mangel an leicht verwertbaren Formen des Kohlenstoffs, Stickstoffs bzw. Phosphors in der lokalen Umgebung eines zu solcher Bildung fähigen Bakteriums ausgelöst (Nicholson et al. 2000). 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 (Nicholson et al. 2000). Dabei ist die Überlebensdauer der Endosporen unter trockenen Umgebungsbedingungen um etwa Faktor 1.000 höher als unter feuchten Umgebungsbedingungen (Abb. 3.27).

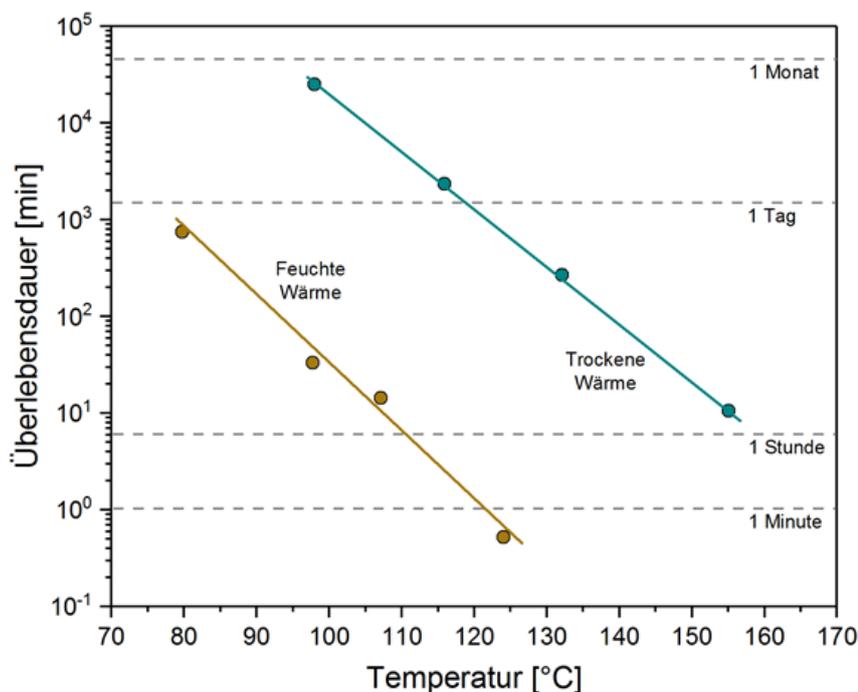


Abb. 3.27: Überlebensdauern, die zu einer zehnfachen Abnahme der Endosporenanzahl der *Bacillus subtilis* führen, in Abhängigkeit von der Temperatur einer trockenen bzw. feuchten thermischen Behandlung (neu gezeichnet aus Nicholson et al. 2000)

Mit ansteigender Behandlungsdauer kann von einer Abnahme der dafür benötigten Behandlungstemperatur ausgegangen werden, da z. B. nur äußerst geringe und keine Mengen an mikrobiellen Biomasse in Sedimentgesteinsschichten vorgefunden wurden, die eine Paläotemperatur von 140°C bzw. 145°C während ihrer Entstehungsgeschichte erfahren haben (Colwell et al. 1997).

### 3.4.3 Bewertung der thermisch bedingten Effekte

Eine Bewertung der temperaturinduzierten Effekte erfolgt anhand der unterschiedlichen Prozessklassen.

Bezüglich des Temperatureinflusses auf die **hydraulischen Eigenschaften** lässt sich folgendes sagen: Eine Veränderung der Permeabilität von geklüftetem kristallinen Gestein aufgrund einer Temperaturerhöhung lässt sich sowohl an den Klüften als auch an der Gesteinsmatrix feststellen. Die Veränderung an den Klüften ist allerdings dominant. Im Zusammenhang mit den Klüften wurde beobachtet, dass wenn Gesteinsproben einer erhöhten Temperatur ausgesetzt wurden oder auch innerhalb eines Temperaturgradienten untersucht wurden, die Permeabilität der Klüfte sich in kurzen Zeiträumen deutlich um ein bis zwei Größenordnungen verringert. Die wesentlichen Ursachen dafür sind in Lösungs- und Ausfällungsprozessen zu sehen sowie in der thermischen Expansion der Gesteine. Durch die thermische Expansion der Minerale dehnen sich diese aus und zwar dorthin, wo Platz ist und Platz ist im Bereich der Klüfte. Die Kluftweite nimmt daher mit steigender Temperatur ab was zu einer signifikanten Reduzierung der Permeabilität führt.

Für den Fall, dass fluidgefüllte Hohlräume isoliert sind und nicht an einem hydraulisch wirksamen Kluftsystem angeschlossen sind, kann sich der thermisch induzierte erhöhte Fluiddruck nicht schnell durch Fluidbewegung abbauen. Die thermische Ausdehnung der Fluide kann in diesen Bereichen zu einer Reduzierung der effektiven Druckspannungen und ggf. zu einer Aufweitung vorhandener Klüfte oder sogar zu einem Aufreißen des Gebirges führen. Dieser Effekt ist allerdings bereits über das Dilatanz-Kriterium und das Fluiddruck-Kriterium abgedeckt.

Wenn Gesteinsproben in einem Temperaturgradienten untersucht werden, finden im „heißen“ Bereich Lösungsvorgänge statt. Wandern die Lösungen dann in „kältere“ Bereiche, finden Mineralausfällungen statt. Diese Ausfällungen verstopfen die Klüfte zusehends was zu einer deutlichen Reduzierung ihrer Permeabilität führt. Im Zusammenhang mit der Einlagerung ist dieser Prozess letztendlich irreversibel, da nach Durchlaufen des Temperaturmaximums es zu keiner weiteren Temperaturerhöhung im Zuge der Abkühlung mehr kommt. Die Ausfällungen und damit die Verstopfungen und Permeabilitätsreduzierungen bleiben erhalten.

Bei intaktem kristallinen Gestein finden Fluidbewegungen auf den Kontaktflächen der Minerale statt aus denen die Gesteine aufgebaut sind. Die Permeabilität ist in diesen Porenräumen zwar um Größenordnungen geringer als in den Klüften, aber der Prozess der Permeabilitätsreduzierung durch thermische Expansion der Minerale greift auch hier. Durch die Ausdehnung der Minerale werden die Porenräume an den Kontaktflächen und damit die Permeabilität verringert. Durch die unterschiedlich starke Expansion der verschiedenen Minerale entstehen bei voranschreitender Temperaturerhöhung und damit Expansion Spannungen, die schließlich zum Aufreißen von Mikrorissen vor allem an den Kontaktflächen der Minerale führen und somit einen gegenteiligen Effekt nämlich eine Erhöhung der Permeabilität bewirken. Die Umkehrung dieses Trends von Verringerung zu Erhöhung der Permeabilität liegt nach bisher bekannten Beobachtungen bei einer Temperatur von etwa 150°C.

Bezüglich des Temperatureinflusses auf die **mechanischen Eigenschaften** lässt sich folgendes sagen: Mit Blick auf die Quantifizierung des Dilatanz-Kriteriums ist die Schädigungsgrenze von besonderem Interesse. Diese zeigt insgesamt eine nur geringe Temperaturabhängigkeit. Diese Feststellung wird auch in der Arbeit von Shao et al. (2015) bestätigt. In diesem Zusammenhang ist die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins von Bedeutung, da sie einen Kennwert innerhalb des Dilatanz-Kriteriums darstellt. Untersuchungen verschiedener Experimentatoren ergaben, dass sich die einaxiale Druckfestigkeit mit zunehmender Temperatur erhöht. Allerdings nur bis zu einer Temperatur von etwa 200°C. Steigt die Temperatur weiter, reduziert sich die Druckfestigkeit stetig.

Grundsätzlich zeigt die Zugfestigkeit eine Abnahme mit der Temperatur. Im Temperaturintervall bis etwa 150°C ist die Abnahme zunächst gering, verstärkt sich aber mit weiter zunehmender Temperatur. Insbesondere im Bereich der Umwandlungstemperatur von Quarz bei 573°C erfolgt eine extreme Reduzierung der Zugfestigkeit. Für die Bewertung mit Blick auf die Integritätsprüfung sind die geringen Änderungen im relevanten Temperaturbereich nicht signifikant, da als diesbezügliches Bewertungskriterium festgesetzt wird, dass generell eine Zugspannungsfreiheit nachzuweisen ist.

Bezüglich des Temperatureinflusses auf die **thermischen Eigenschaften** lässt sich folgendes sagen: Die Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine verringert sich mit zunehmender Temperatur, wohingegen die spezifische Wärmekapazität und auch der Kopplungsparameter thermischer Expansionskoeffizient sich mit zunehmender Temperatur leicht erhöhen. Alle diese Eigenschaften spielen zwar für die Auslegung der Einlagerungsbereiche eine Rolle, sind aber aufgrund ihrer Geringfügigkeit für die Integritätsprüfung und damit für die Definition eines Temperatur-Kriteriums von untergeordneter Bedeutung.

Bezüglich **chemischer Aspekte** des Temperatureinflusses lässt sich folgendes sagen: Die Sorptionseigenschaften der geologischen Barriere (ewG) scheinen sich mit steigender Temperatur laut dem aktuellen Stand des Wissens nicht zu verschlechtern. Die Verfügbarkeit von Sulfat in wasserführenden Klüften des Wirtsgesteins außerhalb der ewG ist zu erwarten. Bei erhöhten Temperaturen kann somit die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) dort zustande kommen, sofern die Temperaturerhöhung dort noch ausreichend hoch ist, was von der Mächtigkeit des jeweiligen ewG und damit der Entfernung von den Behältern abhängt. Innerhalb der einzelnen ewG, deren Lage dergestalt gewählt ist, dass sich keine signifikant wasserführenden Klüfte darin befinden, ist von einem nur sehr geringen Lösungs- und damit Sulfatangebot in Lösungen auszugehen. Darüber hinaus weist die TSR eine relativ langsame Kinetik auf, was bedeutet, dass ausreichend hohe Temperaturen auch über einen langen Zeitraum aufrechterhalten werden müssen, damit ein TSR-Prozess zu signifikanten Reduktionen führt. Die thermochemische Sulfatreduktion ist im Bereich von ewG-Zellen als vernachlässigbar einzustufen.

Bezüglich **mineralogischer Aspekte** des Temperatureinflusses lässt sich folgendes sagen: Da die Kristallin-gesteinsbildenden Mineralen bei deutlich höheren Temperaturen als 400°C und deutlich höheren Drucken als im Endlagerhorizont entstanden sind, alterieren sie bei allen niedrigeren Temperaturen in Kontakt mit einer Lösung. Das Ausmaß dieser Alteration ist nur durch die Verfügbarkeit von Lösungen in den Klüften im Wirtsgestein begrenzt. Bei dieser Alteration im Temperaturbereich unterhalb von etwa 180–200°C werden vor allem Albit, Glimmer, Chlorite, Illite, Smektit, Kaolinite, Zeolithe, Calcite und Pyrite gebildet. Diese Minerale sind in der geologischen Barriere entweder ohnehin bereits vorhanden oder aber, wie Chlorite, Illite, Smektit und Zeolithe, weisen günstigere Sorptionseigenschaften als die ursprünglichen

Minerale aus, so dass sich daraus keine Beeinträchtigung der geologischen Barriere bei erhöhten Temperaturen erkennen lässt.

Bezüglich **mikrobiologischer Aspekte** des Temperatureinflusses lässt sich folgendes sagen: Unter den Bedingungen des mangelnden organischen Kohlenstoffs in endlagerrelevanten Teufen eines kristallinen Wirtsgesteins wird die anaerobe mikrobiell-getriebene Methanoxidierung nach der Reaktion gemäß Gleichung 3.18 als die maßgebliche Reaktion für die Produktion von Schwefelwasserstoffs ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und für die sich daraus ergebende Pyrit-Bildung in Klüften der granitischen Gesteine angesehen. Bei einer ggf. vorhandenen Quelle von organischem Kohlenstoff im Endlagersystem kann auch die mikrobielle Sulfatreduktion an Bedeutung gewinnen. Würde das dadurch produzierte  $\text{H}_2\text{S}$  ( $\text{HS}^-$ ) zum Behälter in der Gasphase oder der flüssigen Phase transportiert werden, so kann dies eine Metallkorrosion verursachen, die ggf. die Integrität der Behälter gefährdet.

Da die Aktivität der Fe(III)-reduzierenden Mikroben in der geologischen Barriere zu einer Produktion und Freisetzung von Fe(II) und somit zum Präzipitieren von  $\text{H}_2\text{S}$  ( $\text{HS}^-$ ) führt, kann sie in dieser Hinsicht als positiv bewertet werden.

**Zusammenfassend** lässt sich feststellen, dass in Anbetracht der oben genannten Argumente die Verhinderung der Aktivität der Sulfat-reduzierenden Bakterien für die Erhaltung der Integrität der Behälter besonders wichtig erscheint. Da diese Bakterienart bis  $95^\circ\text{C}$  gedeihen und Endosporen bilden können, die ihr Überleben auch bei um  $30\text{--}40^\circ\text{C}$  höheren Temperaturen ermöglichen, wird für die Verhinderung ihrer Aktivität eine thermische Behandlung für einige Stunden bis Tage bei etwa  $135^\circ\text{C}$  bzw. für einige Wochen bis Monate bei  $125^\circ\text{C}$  benötigt, um etwaige Endosporen im Nahbereich der Einlagerungsbohrlöcher zu eliminieren.

#### 3.4.4 Einschätzung zur Grenztemperatur für die Option multipler ewG

Mit Blick auf die oben genannte Bewertung kann die Integritätsprüfung in ihrer Robustheit gestärkt werden, wenn in den ewG-Zellen innerhalb des kristallinen Wirtsgesteins eine Temperatur von  $150^\circ\text{C}$  außerhalb von auffahrungsbedingten Auflockerungszonen erreicht aber auch nicht überschritten wird.

### 3.5 Bewertung eines chemischen Einflusses

Nach §5 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020) dürfen *die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.*

Diese Forderung gilt speziell für die betrachtete Option „multipler ewG“, da hier die Einlagerungsbereiche im Kristallin angeordnet sind. Während der Betriebsphase eines Endlagers werden eine Reihe unterschiedlicher artfremder Materialien in das untertägige Grubengebäude und auch in den Einlagerungsbereich eingebracht. Allerdings verbleiben abgesehen von den radioaktiven Abfällen und deren Behältern nur wenige artfremde Materialien auch nach dem Verschluss im Einlagerungsbereich. Zu diesen Materialien zählen solche, die zu Stütz- und Abdichtzwecken verwendet werden wie Beton, Metall, Bentonit, Asphalt oder Sand und Kies.

Beton wird zum einen als Spritzbeton zur Sicherung der Streckenkontur und zum anderen als Widerlagermaterial im Zusammenhang mit Abdichtbauwerken eingesetzt. Neben den Behältern werden Metalle auch für Anker, die Bewehrung im Beton und die Liner verwendet, die im

Rahmen der Option multipler ewG zur Ermöglichung einer vergleichsweise einfachen Rückholbarkeit dienen. Bentonit und Asphalt sind spezielle Abdichtmaterialien und Sand und Kies dienen in erster Linie als Filtermaterial.

Bei der Option „multipler ewG“ steht der zur vereinfachten Rückholung integrierte Bohrlochliner in Kontakt mit dem Gestein. Eine chemische Interaktion findet in erster Linie über die Lösung aus dem Gestein statt. Diese Interaktion beeinflusst die Korrosion des Metalls.

Unter anaeroben Bedingungen wird durch Korrosion von eisenhaltigen Materialien (Stähle, Gusseisen) Wasserstoffgas, geringe Konzentrationen von Fe(II) und Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) als wahrscheinlichstes Endprodukt gebildet (Posiva 2012). Je nach Gehalt an Sulfiden und Karbonaten in der Lösung können sich auch andere Sekundärphasen bilden wie Sulfid-Spezies ( $\text{CuFeS}_2$  oder  $\text{FeS}$ ) bzw. Karbonat-Spezies ( $\text{FeCO}_3$  oder  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ). Vergleichbare Korrosionsprodukte wurden auch von Romaine et al. (2013) für die anaerobe Korrosion von eisenhaltigen Materialien in Kontakt mit NaCl-Wässern gefunden, wie sie auch in granitischen Wässern auftreten können (Mrugalla et al. 2020). Die Korrosionsprodukte werden ggf. über das Kluftsystem abtransportiert und können sich dort auch ablagern. Generell sind Korrosionsprodukte (insbesondere Eisenoxide/-hydroxide) gute Sorbenten für Kationen und können zur Radionuklidrückhaltung im Nahbereich beitragen. Es wird eingeschätzt, dass hiermit keine im Hinblick auf die Langzeitsicherheit negative Wechselwirkung verbunden ist.

Im Falle von Asphalt wird davon ausgegangen, dass er keine signifikanten bzw. weiträumigen chemischen Wechselwirkungen mit dem kristallinen Gestein eingeht. Aus der Literatur ist bekannt, dass eine Wechselwirkung im Bereich der Berührungszone zwischen Bitumen/Asphalt und Gestein stattfindet (Radenberg 2014). Die Wechselwirkung besteht in erster Linie in dem Haftverhalten also der adhäsiven Verbindung von Bitumen und Gestein (Kahnt 2016), die sowohl von den Eigenschaften der Materialien als auch der Umgebungstemperatur abhängt.

Als Sand wird in erster Linie Quarzsand verwendet, der unter den gegebenen Endlagerbedingungen als chemisch inert angesehen werden kann.

Bei Bentonit wird eingeschätzt, dass keine relevante Beeinflussung des kristallinen Gesteins erfolgt. Eine mögliche Wechselwirkung besteht darin, dass Lösung aus dem kristallinen Gestein an der Schnittstelle zum Bentonit diesen durch Suspensionsbildung erodiert und das Bentonitmaterial langsam in sehr verdünnter Form in angrenzende Klüfte transportiert. Ggf. kann es zu einer Ansammlung von erodiertem Bentonit in bestimmten Kluftbereichen kommen. Dieser Vorgang führt zu einer Verringerung der Permeabilität in diesen Kluftbereichen. Negative Effekte auf das Gestein sind dabei nicht zu erwarten (Pusch 1983).

Im Fall von Beton ist die Sachlage grundlegend anders. Es ist seit langem bekannt, dass die Zementphasen im Beton nicht langzeitstabil sind. Das wesentliche Phänomen ist, dass Lösung, die durch Beton migriert, durch Wechselwirkung einen höheren pH-Wert erlangt. Details zum Reaktionsverlauf sind z. B. in Deissmann et al. (2021) beschrieben. Dringt diese Lösung mit erhöhtem pH-Wert in das kristalline Gestein ein, kann dies zu Veränderungen vor allem an Mineralen in Kluft- oder Risszonen führen (z. B. Brandenbergh & Wiborgh 1982, Bath et al. 1987).

Mäder et al. (2006) führten im Rahmen des HPF Projektes (Hyperalkaline Plume in Fractured Rock) sowohl Labor- als auch In-situ-Versuche im Felslabor Grimsel in der Schweiz durch. Wesentliche Aussagen, die sich daraus ableiten lassen, sind, dass hyperalkalische Lösungen

sehr reaktiv sein können und daher zu Auflösungs- und Ausfällungserscheinungen speziell innerhalb von Klüften führen können. Dies bringt Veränderungen des hydraulischen Fließregimes in der Umgebung mit sich. Es wurde ein Trend beobachtet, dass durch diese Ausfällungen eine Selbstheilung und damit eine Reduktion der Permeabilität der Klüfte stattfindet und dass dieses Phänomen robust ist und vergleichsweise hohen hydraulischen Gradienten widerstehen konnte. Es kann somit als irreversibel angesehen werden.

In dem Bericht von Soler et al. (2006) wird noch darauf hingewiesen, dass das Gesamtverhalten des Systems wegen des stochastischen Charakters der hydraulischen Leitfähigkeit zwar verstanden wurde, aber die Klüftzone in ihrer geometrischen Ausprägung so heterogen und willkürlich ist, dass es unwahrscheinlich ist, die räumliche Ausprägung im Wirtsgestein vorherzusagen zu können.

Soler & Mäder (2010) ergänzen die Ergebnisse und Interpretation noch dahingehend, dass die Hoch-pH-Wert-Lösung zwar signifikant die hydraulische Leitfähigkeit reduziert, dass aber die Intensität der Mineralumwandlungen vergleichsweise gering ausfällt. Sie erklären das damit, dass sich in erster Linie die Porengeometrie verändert und zu längeren Fließwegen führt und dass vermutlich nicht eine Verringerung der Gesamtporosität erfolgt und damit ein reines Verstopfen der Poren die Ursache ist.

Im Rahmen eines Langzeitversuches wurden Gesteinsproben über 15 Jahre einer Lösung mit hohem pH-Wert ausgesetzt (Moyce et al. 2014). Diese Versuche fanden auf Veranlassung des British Geological Survey im Rahmen des Nirex Safety Assessment Research Programme (NSARP) statt. Es wurde festgestellt, dass durch die ausgelösten Mineralalterationen die Sorptionskapazität des Gesteins für U(VI) erhöht wurde. Dies kann nicht als negative Beeinflussung gewertet werden.

Deissmann et al. (2021) führen noch an, dass alkalische Grundwasserbedingungen je nach Zementsorte und hydraulischen Verhältnissen durchaus mehrere 10.000 Jahre anhalten können.

In Arbeiten von Pastina et al. (2012), Alexander (2009) und Koskinen (2014) wird darauf hingewiesen, dass es schwierig ist, chemische Alterationseffekte im Rahmen eines Safety Case quantifiziert zu berücksichtigen. Versucht man dies für die Gesteinseigenschaft Permeabilität, so könnte man z. B. von Angaben des AkEnd ausgehen, der die Medianwerte zur Permeabilität der Gesteine angeschaut hat und von einem Vertrauensintervall von 95% (AkEnd 2002) ausgegangen ist. Würde man eine analoge Betrachtung machen, so könnte man fordern, dass eine Änderung der Permeabilität eines ewG durch chemische Beeinflussung nicht größer sein sollte als das Vertrauensintervall aller Messergebnisse zur Permeabilität, die z. B. im Zuge der Standortuntersuchungen durchgeführt werden. Festzuhalten ist aber auch, dass die Permeabilitätsänderung allein nicht grundsätzlich entscheidend ist, sofern sie sich nur über einen geringen Gesteinsbereich beschränkt. Eine in dem Zusammenhang praktikable Möglichkeit wäre die Verwendung von geometrischen Parametern wie z. B. der Eindringtiefe signifikanter chemischer Veränderungen anstelle der Gesteinseigenschaften selbst. Bleibt man bei einer zulässigen Permeabilitätsänderung innerhalb dieses Vertrauensintervalls, so könnte man das auf eine zulässige Mächtigungsänderung der Gesteinsbarriere von gleicher Größenordnung übertragen.

Beispiel:

Bei einer ewG-Mächtigkeit von 100 m und einem Auffahrungsbereich von ca. 30 m blieben für die Barriere vertikal noch 2x35 m (Abb. 3.28). Legt man beispielsweise ein Vertrauensintervall

von 95% zu Grunde so bedeutet dies eine zulässige Verkleinerung der Mächtigkeit der Barriere von 5% was eine Barrieremächtigkeit von 33,25 m bedeutet. Man hätte bei diesem Beispiel also rechnerisch einen zulässigen beeinflussten Bereich von 1,75 m. Alternativ könnte man auch den ewG entsprechend verkleinern. Dies wäre analog zu der Aussage, dass die auffahrungsbedingte Auflockerungszone bei der Festlegung des ewG auch nicht berücksichtigt wird.

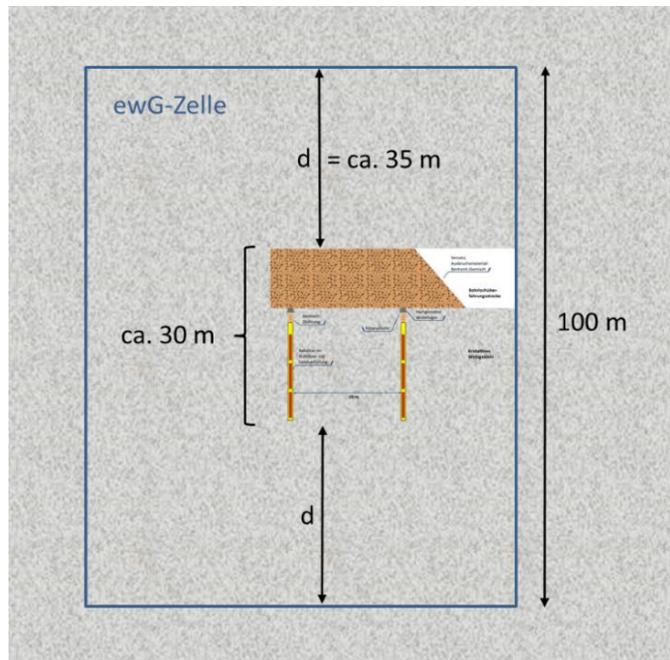


Abb. 3.28: Schematisierte Skizze einer ewG-Zelle; die Details der Einlagerungskonfiguration sind in Jobmann & Burlaka (2021) dargestellt

Für die Auflockerungszone (ALZ) im Umfeld von Strecken im Kristallin lässt sich ein Maximalwert für die ALZ von 2 m (Nagra) in der Literatur finden (Bäckblom 2008). Die ALZ ist per Definition eine geschädigte Zone und im Zuge einer Integritätsprüfung nicht zu betrachten. Grundlage für eine Prüfung könnte sein, dass signifikante chemische Beeinflussungen, die Permeabilitätsänderungen oder Änderungen der Sorptionsfähigkeit erwarten lassen, sich auf den Bereich der lokalen ALZ beschränken, höchstens jedoch eine in der Sicherheitsbewertung zu berücksichtigende Verkleinerung der ewG-Umschließung in der Größenordnung des Vertrauensintervalls der Messwerte der betrachteten Eigenschaft bewirken.

Eine ergänzende (ggf. alternative) Möglichkeit zur Bewertung eines chemischen Einflusses wäre, die Indikatoren gemäß §4 EndlSiAnfV (2020) zu verwenden. Als Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) kann nach §4 EndlSiAnfV (2020) die Sicherheitsfunktion des Einschusses der Radionuklide im ewG angesehen werden. Die Bewertung des sicheren Einschusses der radioaktiven Abfälle im Endlagersystem erfolgt demnach anhand des errechneten Anteils

- der jährlich bzw. im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren freigesetzten Masse (Indikatoren JAM bzw. GAM) sowie
- der jährlich bzw. im Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren freigesetzten Anzahl der Atome (Indikatoren JAN bzw. GAN)

aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem ewG.

Der Einfluss der eingebrachten Materialien auf die chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich und die dadurch verursachte Beeinträchtigung der Barrierewirkung des ewG lässt sich durch die in §4 definierten Indikatoren für den sicheren Einschluss quantifizieren. Das ist zwar

nur eine Methode zur indirekten Bewertung, bietet aber die Möglichkeit, eine zulässige Beeinflussung durch die Bewertung des sicheren Einschlusses als Ganzes abzuleiten. Da die mechanische und hydraulische Beeinflussung bereits über das Dilatanz- und Fluiddruck-Kriterium abgedeckt sind, erscheint dies ein gangbarer Weg. Dazu sind die Ergebnisse von zwei Betrachtungen zur Ausbreitung von Radionukliden aus dem ewG zu vergleichen, nämlich

1. die Ausbreitung von Radionukliden aus dem ewG für die durch das Endlager unbeeinflussten, natürlichen (zeitlich konstanten) geochemischen Verhältnisse im Bereich des ewG und
2. die Ausbreitung von Radionukliden aus dem ewG für die bei der erwarteten Entwicklung des Endlagers vorherrschenden (zeitlich variablen) geochemischen Verhältnisse unter Berücksichtigung der zu erwartenden Ungewissheiten. Das setzt allerdings voraus, dass die zu erwartenden Ungewissheiten adäquat abgebildet werden.

Eine erhebliche Beeinträchtigung der Barrierewirkung des ewG ist dann zu sehen, falls im Fall 1 die Prüfungen für alle vier Indikatoren den sicheren Einschluss der Radionuklide im ewG bestätigen, während im Fall 2 einer oder mehrere Indikatoren zeigen, dass für die zu erwartenden geochemischen Bedingungen bei Beeinflussung durch die eingebrachten Materialien der sichere Einschluss nicht gezeigt werden kann. Oder falls es doch gezeigt werden kann, geht dies ggf. mit einer deutlich verringerten Robustheit des Systems einher.

Falls für die erwartete Entwicklung der sichere Einschluss der Radionuklide nicht gezeigt werden kann, dann ist das Endlagerkonzept nicht genehmigungsfähig. Wenn für die natürlichen geochemischen Verhältnisse der sichere Einschluss der Radionuklide theoretisch gezeigt werden könnte und somit durch die eingebrachten Materialien eine wesentliche Beeinflussung der Barrierewirkung des ewG besteht, dann ist das Endlagerkonzept so zu verändern, dass die Beeinflussung der Barrierewirkung des ewG verringert wird.

Als vergleichendes Maß zur Bewertung der Beeinflussung der eingelagerten Materialien auf die Barrierewirkung des ewG bei der Optimierung des Endlagersystems könnte die Verringerung des Sicherheitsabstands der vier Indikatoren zum Bezugswert bei den beiden definierten Fällen betrachtet werden. Dieser ergibt sich für jedes betrachtete Endlagerkonzept aus dem Quotienten der Indikatorwerte im Fall 2 und Fall 1. Je kleiner dieser Quotient, desto weniger wird der sichere Einschluss der Radionuklide im ewG durch die von den eingebrachten Materialien beeinflussten geochemischen Verhältnisse verändert.

## 4 Quantifizierung der Kriterien für die Option „überlagernder ewG“

Für die Option „überlagernder ewG“ existieren grundsätzlich zwei Formen. Ein „überlagernder ewG“ kann entweder durch eine Salz- oder eine Tonformation gebildet werden.

### 4.1 Salzformation als überlagernder ewG

In den vergangenen Jahrzehnten erfolgten in den mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle befassten Institutionen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen in Deutschland. Im Zuge dieser Arbeiten wurden, speziell seitens der BGR in Hannover, quantifizierte Kriterien zur Prüfung der Integrität des Salzgesteins aufgestellt (z. B. Heusermann 2001). Im Folgenden wird eine zusammenfassende Darstellung bezüglich dieser Kriterien gegeben, um aufzuzeigen, wie eine Salzformation als überlagernder ewG hinsichtlich ihrer Integrität geprüft werden kann.

Eine Salinarformation besteht in der Regel überwiegend aus dem halitischen Salzgestein Steinsalz, den in den Kaliflözen abgelagerten Salzgesteinen, zu denen hauptsächlich Carnallit, Sylvinit und Hartsalz zählen, den anhydritischen nicht kriechfähigen Gesteinsschichten und den tonhaltigen Schichten wie Salzton (Weitkamp et al. 2021). Das mechanische Verhalten der anstehenden Salinargesteine reicht dabei von duktil und kriechfähig, wie bei Steinsalz, über spröde und kriechfähig (typisch für Carnallit) bis zu spröde und nicht kriechfähig, wie bei Anhydrit.

Aufgrund der Entstehung durch sedimentäre Ablagerung und der Entwicklung von Salzlagerstätten liegen im Salzgebirge immer Schichtgrenzen zwischen Steinsalz und benachbarten Salinargesteinen (Kalisalze, Anhydrit, Salzton) vor. Diese begrenzen Gesteinsschichten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften bezüglich thermischer Ausdehnungskoeffizienten, elastischer und plastischer Eigenschaften sowie Kriecheigenschaften, woraus resultiert, dass sie bei thermomechanischer Beanspruchung mit induzierten Scherspannungen bevorzugt als potenzielle Wegsamkeiten in Frage kommen können. Weitere hydraulische und/oder mechanische Schwächeflächen können auch innerhalb größerer Homogenbereiche auftreten, wenn dort z. B. Schichtflächen ausgebildet sind oder lithologische Unterschiede, z. B. ein Wechsel in der Korngröße oder lagige Anhydriteinschaltungen, vorliegen.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Salinarformationen im unverritzten Zustand als hydraulisch dicht zu charakterisieren sind. Erst im Zusammenhang mit den durch die nachfolgend genannten Vorgänge induzierten Spannungs- und Verformungsfeldern sowie hydraulischen Belastungen wird das Integritäts- und Permeabilitätsverhalten dieser geologischen Barriere beeinflusst (Minkley et al. 2010):

- geogene Vorgänge
- bergbauinduzierte Beanspruchungen
- thermomechanische Beanspruchungen
- Fluiddruck-generierte Beanspruchungen

Für die Integritätsprüfung von Steinsalz sind folgende Prozesse von wesentlicher Bedeutung:

- mechanische Schädigung durch anthropogen geschaffene Hohlräume. Dieser Prozess ist hinsichtlich seiner Reichweite ins Gebirge begrenzt und bedingt die Ausbildung einer Auflockerungszone (ALZ). Die Mächtigkeit dieser ALZ ist zu bestimmen, da sie bei der Integritätsprüfung nicht einzubeziehen ist. Für die Option des überlagernden ewG

betrifft dies ausschließlich die Tageszugänge in Form von Schächten und/oder Rampen.

- thermomechanisch bedingte Spannungsänderungen und Verformungen: Die Ausprägung dieser Prozesse in einer überlagernden Salzformation hängen von der Entfernung des Einlagerungsbereiches von der überlagernden Formation ab. Die Beeinflussung durch thermisch induzierte Gesteinsausdehnung sowie Hebung wird umso stärker ausfallen je dichter der Einlagerungsbereich unterhalb der Salzformation liegt. Als Folge kann mechanische Schädigung resultieren sowie zusätzlich eine
- Fluiddruck-getriebene Generierung von hydraulischen Fließwegen entlang von Diskontinuitäten im mikro- und makroskopischen Maßstab (Korngrenzen, Schichtflächen), wenn die Fluiddrücke größer als die minimale Hauptspannung sind.

Die Integritätsprüfung erfolgt anhand der Simulation von geomechanischen Prozessen, die zur Entstehung von Mikrorissen durch mechanische Schädigung oder Fluiddruck-getriebene Öffnung von Korngrenzen führen, da die hierbei entstehenden Wegsamkeiten schließlich das Eindringen von Lösungen in die Einlagerungsfelder (oder umgekehrt) ermöglichen könnten. Diese Vorgehensweise hat zur Folge, dass die Bewertung der hydraulischen Barriereigenschaften auf der Grundlage mechanischer Zustandsgrößen, nämlich berechneter Spannungs- und Verformungsfelder, erfolgt.

#### 4.1.1 Dilatanz-Kriterium

Dieses Kriterium fordert, dass bei deviatorischer Beanspruchung keine durchschlagenden Gefügebrauchungen mit induziertem Risswachstum und Vernetzung interkristalliner Risse entstehen. Der Vorgang der Gefügebrauchung ist allgemein mit Dilatanz, d. h. einer Volumenzunahme durch die Ausbildung von Mikrorissen und Rissakkumulationen, verbunden. Die Integrität ist grundsätzlich erfüllt, wenn keine Schädigung des Gebirges auftritt.

Es ist wissenschaftlich nachgewiesen, dass Spannungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze auch langfristig nicht mit Auflockerungen verbunden sind, so dass für Spannungen in diesem Bereich die Dichtigkeit des Salzgesteins gewährleistet ist (Gl. 4.1). Der Spannungszustand, an dem die Volumenänderung ( $d\epsilon_{vol}$ ) positiv wird, also Dilatanz infolge Schädigung eintritt, wird als Dilatanzgrenze bezeichnet (vgl. Abb. 4.1). Erst Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze führen zu einer Auflockerung des Mikrogefüges im Kristallverband, wodurch bei Andauern des Zustandes allmählich ein Netzwerk von Mikrorissen entsteht. Das Kriterium lautet demnach (Heusermann 2001):

#### „Dilatanz-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass keine Schädigung des Steinsalzes durch Gefügebrauchung erfolgt.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$\frac{d\epsilon_{vol}}{d\epsilon_1} \leq 0$$

(4.1)

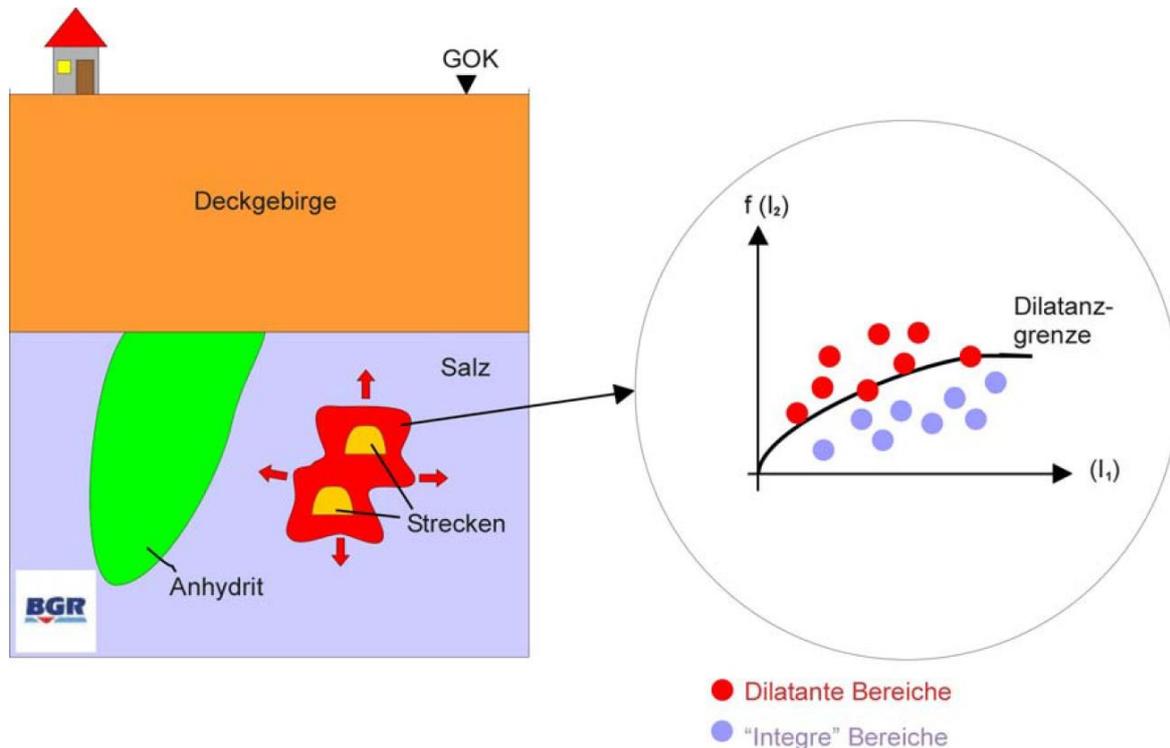


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des Dilatanzkriteriums (Heusermann et al. 2007, Krone et al. 2008)

#### 4.1.2 Fluiddruck-Kriterium

Das Kriterium verlangt, dass die kleinste Gebirgsdruckspannung  $\sigma_{min}$  in der abdichtenden Barriere zuzüglich einer zu überwindenden Zugfestigkeit  $\sigma_z$  größer als der in der entsprechenden Teufenlage hypothetisch mögliche Fluiddruck  $p_{Fl}$  sein muss (vgl. Abb. 4.2). Ist das Kriterium erfüllt, ist ein druckgetriebenes Eindringen von möglicherweise anstehendem Fluid unter den gegebenen Einspannungsbedingungen nicht möglich (Heusermann 2001). Demnach lautet das Kriterium:

#### „Fluiddruck-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass die kleinste Gebirgsdruckspannung innerhalb des überlagernden ewG zuzüglich der Zugfestigkeit des Steinsalzes größer ist, als der in der entsprechenden Teufenlage mögliche Fluiddruck.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz folgender Formalismus, wobei als Referenzwert für die Zugfestigkeit des Steinsalzes ein Wert von 1 MPa angenommen werden kann. Dieser Wert ist standortspezifisch zu überprüfen und ggf. anzupassen.

$$\frac{\sigma_{min} - \sigma_z}{p_{Fl}} > 1 \quad (4.2)$$

Seitens BGR wird eine etwas vereinfachte Beschreibung dieses Kriteriums verwendet, das dann als *Laugendruckkriterium* bezeichnet wird. Es besagt, dass das Kriterium erfüllt ist, wenn

die kleinste Hauptspannung nicht unter den Wert des in der entsprechenden Tiefe anzunehmenden hydrostatischen Drucks fällt:

$$p_{fl} - \sigma_{\min} < 0 \quad (4.3)$$

Wenn im Rahmen der Untersuchungen bei der Bewertung mit dem Fluidruck-Kriterium nach (Gl. 4.2) kein Kredit von einer möglichen Zugfestigkeit genommen wird, d. h.  $\sigma_z = 0$ , ist die qualitative Aussage beider Ansätze gleich.

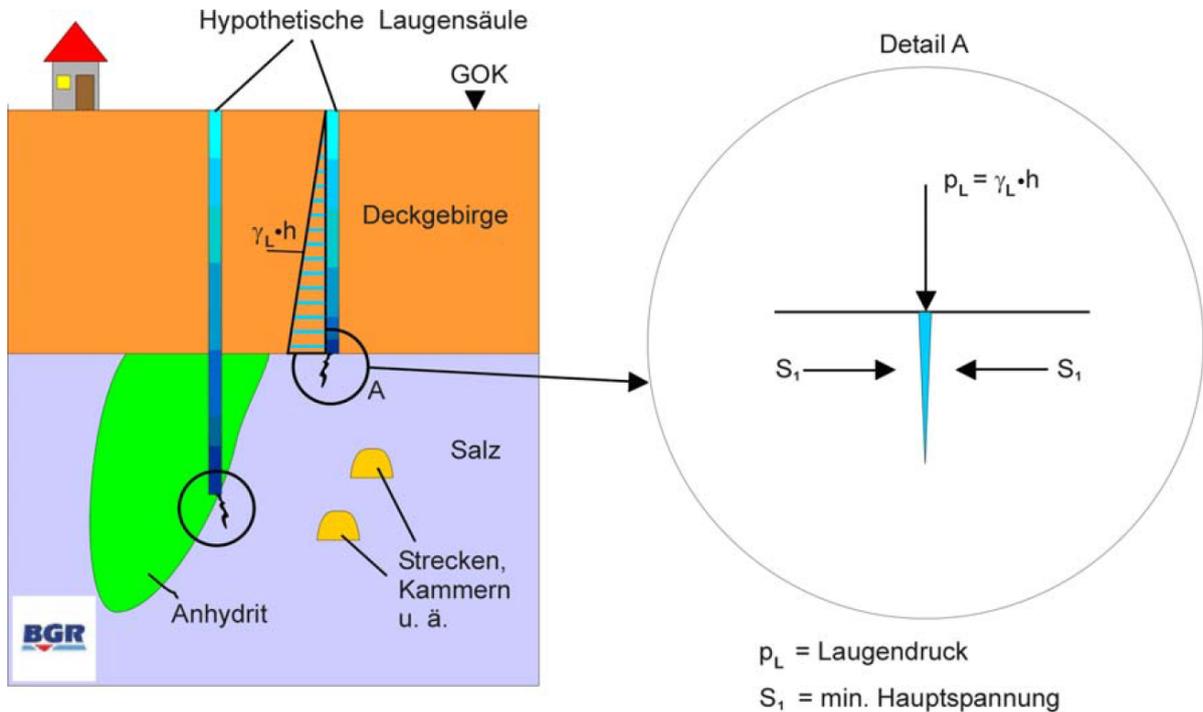


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des Fluiddruckkriteriums (Heusermann et al. 2007, Krone et al. 2008)

#### 4.1.3 Temperatur-Kriterium

Gemäß den Sicherheitsanforderungen ist zur Bewertung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu prüfen und darzustellen, dass (EndlSiAnfV 2020, § 5, Absatz 2, Punkt 4)

*„durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird ...“*

Im Standortauswahlgesetz wird für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aus Vorsorgegründen eine Grenztemperatur festgelegt. Dazu heißt es (StandAG 2017, §27 Absatz 4):

*„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“*

Aus diesem Grund wird das Temperatur-Kriterium zunächst wie folgt definiert:

#### **„Temperatur-Kriterium“**

Es ist nachzuweisen, dass an der Behälteroberfläche eine Temperatur von 100°C nicht überschritten wird.

Im Folgenden wird geprüft, ob und falls ja, inwieweit eine Abweichung von dieser vorläufigen Grenztemperatur für die Einlagerungsoption „überlagernder ewG“ möglich bzw. sinnvoll wäre.

#### **4.1.3.1 Thermisch induzierte Prozesse**

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. Die zulässige maximale Grenztemperatur ist so zu wählen, dass keine Spannungen auftreten, welche die Zugfestigkeit von Steinsalz (ca. 1 MPa) übersteigen. Dies gilt insbesondere für Minerale mit sprödem Bruchverhalten wie Anhydrit (Brasser et al. 2008). Die Bildung von Wegsamkeiten für Fluide und somit potentielle Migrationspfade für Radionuklide werden dadurch verhindert.

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 (Brasser et al. 2008). Dies bezieht sich auf das Freisetzen von Kristallwasser aus Hydratsalzen infolge der thermischen Zersetzung ab einer spezifischen kritischen Temperatur. Häufig wird in nationalen Studien eine maximale Grenztemperatur von 200°C an der Kontaktfläche zwischen Einlagerungsstrecke und Salzformation im Salzgestein genannt (z.B. DBETEC 2016 oder Mönig et al. 2011), die unterhalb der kritischen Temperaturen von Hydratsalzen liegt. Bei dieser Maximaltemperatur ist die thermische Stabilität des Polyhalits sicher gewährleistet. Nach bisher vorliegenden Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass die thermische Kristallwasserfreisetzung im Carnallit durch den im Intergranular- und Porenraum des Gesteins herrschenden Wasserdampf-Partialdruck kontrolliert wird. Unter Bedingungen des unverritzten Gebirges bei 1000 m Teufe und ca. 24 MPa Druck ist der Carnallit bis nahe dem Schmelzpunkt (167,5°C) thermisch stabil, während er bei Atmosphärendrücken bereits bei ca. 80°C beginnt, Kristallwasser abzugeben. Bisherige Auslegungsberechnungen für Endlager im Steinsalz, die auf einer Grenztemperatur von 200°C beruhen, berücksichtigen dies durch Einhaltung von ausreichenden Mindestabständen zum Carnallit.

Im Falle des überlagernden ewG ist ein bestimmter Abstand zu den Einlagerungsbereichen systembedingt gegeben, da ein Endlager in einer sich im Liegenden einer flach lagernden Salzformation befindlichen Kristallinformation deutlich unterhalb der Kristallinoberfläche errichtet wird. Als Arbeitshypothese wird derzeit von einem Abstand von etwa 50 m ausgegangen. Aus Gründen der Konservativität sollte, unabhängig von Mindestabständen und mit Blick auf die thermische Stabilität von Carnallit, in Abhängigkeit von der Tiefenlage des zu betrachtenden überlagernden ewG, also standortbezogen, eine geeignete Grenztemperatur festgelegt werden, welche die thermische Stabilität von Carnallit nicht gefährdet. Für das in diesem Projekt betrachtete geologische Modell befindet sich die Basis des Steinsalzes der Barriereformation, in dem sich der ewG befindet, am geplanten Schachtstandort in einer Tiefe von 860 m. Für diese Tiefenlage und dem zugehörigen petrostatischen Druck läge die Grenztemperatur bei etwa 155°C.

Bedenkt man, dass bei der Option „überlagernder ewG“ die Behälter in der unterhalb des ewG liegenden kristallinen Formation, mit einem gewissen noch festzulegenden Mindestabstand (Arbeitshypothese 50 m), eingelagert werden, so wäre eine deutlich höhere Temperatur an der Behälteroberfläche möglich, ohne dass der ewG thermisch bedingt in Mitleidenschaft gezogen würde. Auf der anderen Seite sollte die Grenztemperatur auch nicht so hoch angesetzt werden, dass das Wirtsgestein in Mitleidenschaft gezogen wird. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle die Einschätzung für die Option „multipler ewG“ übernommen.

## 4.2 Tonformation als überlagernder ewG

Im Rahmen dieses Projektes wird kein Beispiel für einen durch eine Tonformation gebildeten „überlagernden ewG“ behandelt. Nichtsdestotrotz sind im Folgenden die Einzelkriterien der Vollständigkeit halber genannt, die in dem Projekt ANSICHT abgeleitet bzw. für die Integritätsprüfung verwendet wurden (Maßmann & Ziefle 2017).

### 4.2.1 Dilatanz-Kriterium

Durch die Einhaltung des Dilatanz-Kriteriums innerhalb des überlagernden ewG soll die Rissaufweitung bzw. Rissbildung und somit die Ausbildung von Fluidwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten von erheblichen Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen führen können (EndlSiAnfV 2020, §5(2)1), ausgeschlossen werden. Im Gegensatz zum Fluiddruck-Kriterium, wird die mechanische Integrität unter Druck- bzw. Scherbeanspruchung untersucht. Analog zu Jobmann et al. (2015) wird vorgeschlagen, eine Grenzbedingung zu wählen, welche die Schädigungsgrenze im Sinne von „Beginn der Schädigung“ abbildet. Somit wird sichergestellt, dass der Spannungsbereich potenzieller Rissweitung, Rissneubildung und -vernetzung mit erfasst wird. Es wird ein Wert für die Grenzbelastung angesetzt, welcher in der Größenordnung der Beanspruchungszustände liegt, die auf Basis der s-Wellengeschwindigkeiten („Mikrorissgrenze“) abgeleitet werden können. Es ist davon auszugehen, dass die Formulierung der Dilatanzgrenze bzw. des Dilatanz-Kriteriums auf dieser Basis den geringsten Betrag der zulässigen Beanspruchung liefert, d. h. hinsichtlich der Sicherheitsbewertung konservativ abdeckend ist.

Bei den Modellberechnungen wird eine spannungsbasierte Formulierung über eine Korrelation der Dilatanzgrenze relativ zur jeweils vorhandenen Bruchfestigkeit verwendet, wobei die Dilatanzgrenze der halben Bruchgrenze entsprechen soll. Die konkrete mathematische Formulierung hängt von dem standortspezifisch zu verwendenden Bruchkriterium ab. Eine ergänzende Kontrolle eines verformungsbasierten Kriteriums, insbesondere bei Berücksichtigung von Kriechen, ist ggf. zu prüfen.

Das Kriterium ist nicht im Bereich von Auflockerungszonen anzuwenden, die sich entlang von Strecken und entlang der Tageszugänge (Schächte oder Rampen) befinden. Diese auffahrbaren Schädigungszonen werden im Rahmen der Sicherheitsbewertung des geotechnischen Barrierensystems behandelt. Das „Dilatanz-Kriterium“ wird demnach wie folgt definiert:

#### „Dilatanz-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass der Spannungszustand unterhalb der Schädigungsgrenzen und somit auch der Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen liegt.

Als Dilatanzgrenze wird im Rahmen der Modellberechnungen angesetzt:

$$\sigma_{\text{dil}} = 0,5 \cdot \sigma_f \quad (4.4)$$

mit

$\sigma_f$  = einaxiale Bruchfestigkeit

Durch diese spannungsbasierte Formulierung erfolgt eine Korrelation der Dilatanzgrenze relativ zur jeweils vorhandenen Bruchfestigkeit. Somit werden indirekt der Spannungszustand und in Abhängigkeit von dem verwendeten Stoffmodell zur Beschreibung des plastischen Gebirgsverhaltens anisotrope Festigkeiten berücksichtigt. Dieser, im Hinblick auf die Sicherheitsbewertung als konservativ einzuschätzende Ansatz, trägt der gegebenen Komplexität und den Ungewissheiten Rechnung. Diese Konservativitäten können grundsätzlich mit Vorlage standortspezifischer Daten abgebaut werden.

Die Beschreibung des Festigkeits- und somit auch des Dilatanz-Verhaltens der anstehenden Gesteine erfolgt unter Ansatz effektiver Spannungen entsprechend Gleichung 4.4. Als Referenzwert für den Biot-Koeffizienten wird in Analogie zum Fluiddruck-Kriterium im Rahmen der exemplarischen Sicherheitsbewertung der gängige Wert von  $\alpha = 0,6$  angesetzt. Dies stellt zunächst einen praktikablen Modellierungsansatz dar, der bei Vorlage ausreichender standortspezifischer Daten überprüft und ggf. angepasst werden muss.

Skaleneffekte bei der Übertragung von Labordaten auf In-situ-Verhältnisse sind für Dilatanzfestigkeiten nicht auszuschließen, können aber gegenwärtig nicht quantifiziert werden und werden im Rahmen der Modellierung nicht berücksichtigt. Dies bleibt ebenfalls zu prüfen und ggf. anzupassen. Das Erfordernis der Betrachtung von Zeiteffekten, d. h. der Unterscheidung in „Kurzzeitfestigkeit“ und „Langzeitfestigkeit“ ist nach gegenwärtigem Stand nicht gegeben und bleibt daher ebenfalls zu prüfen und ggf. anzupassen. Es wird angenommen, dass durch die konservative Wahl der Dilatanzgrenze eine ggf. vorhandene Abhängigkeit der Festigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit bzw. Belastungsdauer abgedeckt ist. Die tendenziell konservative Wahl der Dilatanzgrenze trägt ebenso der Festigkeitsanisotropie, sowie ggf. im Wirtsgestein vorhandenen Trennflächensystemen Rechnung.

#### 4.2.2 Fluiddruck-Kriterium

Bei Modellberechnungen zur Integrität des „überlagernden ewG“ wird ein Ansatz verfolgt, der die Kopplung von thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozessen berücksichtigt (THM). Die hydraulisch-mechanische Kopplung basiert auf dem Ansatz der effektiven Spannungen, der auf Terzaghi & Fröhlich (1936) zurückgeführt werden kann. Hiernach stehen die totalen (äußeren) Spannungen  $\sigma^{tot}$  im Gleichgewicht zu den effektiven Spannungen  $\sigma^{eff}$ , die auf dem Korngerüst wirken und über den Biot-Koeffizienten  $\alpha$  mit dem Porendruck  $p$  verknüpft sind:

$$\sigma^{eff} = \sigma^{tot} - \alpha \cdot p \cdot \mathbf{1} \quad (4.5)$$

Für die Formulierung des mechanischen Verhaltens (Spannungs-Dehnungsverhalten) wird im Allgemeinen die effektive Spannung verwendet.

Unter Fluidwegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten von erheblichen Mengen an Flüssigkeiten oder Gasen führen können (EndlSiAnfV 2020, §5(2)1), werden offene Makrorisse verstanden. Diese können sich nur dann ausbilden, wenn die Zugfestigkeit des Gesteins von der effektiven Spannung überschritten wird. Durch den Ansatz der THM Kopplung mit dem Konzept der effektiven Spannungen (Terzaghi & Fröhlich 1936), kann die Zugfestigkeit sowohl durch thermische, mechanische als auch durch hydraulische Prozesse oder deren Kombination erreicht werden. So wird auch die Verringerung von Druckspannungen im Korngerüst durch eine Erhöhung des Porenwasserdrucks, beispielsweise hervorgerufen durch thermisch bedingte Verringerung der Fluidichte, abgebildet.

Da die Zugfestigkeit des Gesteins durch die Schichtung und mögliche Vorschädigung aus der Belastungshistorie beeinflusst sein kann und im Extremfall zu Null werden könnte, sollte als Kriterium die effektive Zugspannung selbst ausgewertet werden. Hierzu muss diejenige Hauptspannung des effektiven Spannungstensors betrachtet werden, welche die größte Zugspannung, bzw. geringste Druckfestigkeit aufweist.

Das Fluiddruck-Kriterium wird demnach wie folgt definiert:

#### „Fluiddruck-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass die effektiven Spannungen innerhalb des überlagernden ewG nicht im Zugspannungsbereich liegen.

Mit der Definition der drei effektiven Hauptspannungen

$$\sigma_I^{eff} \leq \sigma_{II}^{eff} \leq \sigma_{III}^{eff} \quad (4.6)$$

können die Zonen, in denen effektive Zugspannungen auftreten, durch die folgende Ungleichung beschrieben werden:

$$\sigma_{III}^{eff} \geq 0 \quad (4.7)$$

Als Referenzwert für den Biot-Koeffizienten (vgl. Gl. 4.4) wird ein Wert von  $\alpha=1$  vorgeschlagen (Alfarra et al. 2020b, S. 73). Nach Vorlage ausreichender standortspezifischer Daten ist diese Annahme zu überprüfen und ggf. anzupassen.

#### 4.2.3 Temperatur-Kriterium

Gemäß den Sicherheitsanforderungen ist zur Bewertung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu prüfen und darzustellen, dass (EndlSiAnfV 2020, § 5, Absatz 2, Punkt 4)

*„durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird ...“*

Im Standortauswahlgesetz wird für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aus Vorsorgegründen eine Grenztemperatur festgelegt. Dazu heißt es (StandAG 2017, § 27 Absatz 4):

*„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“*

Aus diesem Grund wird das Temperatur-Kriterium zunächst wie folgt definiert:

#### „Temperatur-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass an der Behälteroberfläche eine Temperatur von 100°C nicht überschritten wird.

Im Folgenden wird geprüft, ob und falls ja, inwieweit eine Abweichung von dieser vorläufigen Grenztemperatur für die Einlagerungsoption „überlagernder ewG“ möglich bzw. sinnvoll wäre.

#### **4.2.3.1 Thermisch induzierte Prozesse**

Es muss zunächst diskutiert werden, unter welchen Umständen eine nicht erhebliche Beeinträchtigung zu erwarten ist. Analysen und Einschätzungen zu entsprechenden thermisch induzierten Effekten sind in Jobmann & Meleshyn (2015) dargestellt. Als wichtigste Effekte sind die thermische Expansion sowie die mikrobielle Aktivität zu nennen. Thermische Expansion findet im Tongestein nur bis zu einer bestimmten Temperatur (etwa 50 – 80°C) statt, eine weitere Temperaturerhöhung führt zur Kontraktion. Eine Temperaturerhöhung über 122°C würde die mikrobielle Gasproduktion und Korrosion signifikant verringern, sich also positiv auf die Barrierewirkung auswirken (Jobmann & Meleshyn 2015). Eine klare obere Grenztemperatur konnte nicht abgeleitet werden, allerdings liegen für Temperaturen über 150°C wenige Kenntnisse über das Materialverhalten vor.

Bedenkt man, dass bei der Option „überlagernder ewG“ die Behälter in der unterhalb des ewG liegenden kristallinen Formation, mit einem gewissen noch festzulegenden Mindestabstand (Arbeitshypothese 50 m), eingelagert werden, so wäre eine deutlich höhere Temperatur an der Behälteroberfläche möglich, ohne dass der ewG thermisch bedingt in Mitleidenschaft gezogen würde. Auf der anderen Seite sollte die Grenztemperatur auch nicht so hoch angesetzt werden, dass das Wirtsgestein in Mitleidenschaft gezogen wird. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle die Einschätzung für die Option „multipler ewG“ übernommen.

#### **4.2.3.2 Einschätzung zur Grenztemperatur für die Option überlagernder ewG (Ton)**

Mit Blick auf die oben genannte Bewertung kann die Integritätsprüfung in ihrer Robustheit gestärkt werden, wenn in den Einlagerungsbereichen innerhalb des kristallinen Wirtsgesteins eine Temperatur von 150°C außerhalb von auffahrungsbedingten Auflockerungszonen erreicht aber auch nicht überschritten wird.

## **5 Quantifizierung der Kriterien für die Option „modifiziertes KBS-3 Konzept“**

Bei dem „modifizierten KBS-3-Konzept“ handelt es sich um eine Einlagerungsoption, bei der in keiner Weise Kredit von der Einschlußwirksamkeit des Gebirges genommen wird. Der sichere Einschluß wird bei dieser Option einzig durch den Behälter gewährleistet. Gemäß dem Einlagerungskonzept wird jeder einzelne Behälter mit einem aus hochkompaktiertem Bentonit bestehenden Buffer umgeben. Dieser Buffer hat in erster Linie eine Schutzfunktion für den Behälter und darüber hinaus eine gewisse Rückhaltewirkung gegenüber Radionukliden, die im Falle einer Freisetzung verzögernd auf den Radionuklidtransport wirkt. Da es sich hier um eine technische und eine geotechnische Barriere handelt, wird an dieser Stelle auf den entsprechenden Bericht (Leon Vargas et al. 2021) verwiesen.

## 6 Zusammenfassung

Zur Erfüllung der in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung weitestgehend qualitativ vorgegebenen Integritätskriterien besteht die Notwendigkeit, diese soweit zu quantifizieren, dass sie im Rahmen von rechnerisch zu führenden Nachweisen abgehandelt werden können. Aus diesem Grund wurden in diesem Bericht die Integritätskriterien quantitativ formuliert, soweit dies nach dem aktuellen Kenntnisstand möglich ist.

Im Rahmen der Einlagerungsoption „multipler ewG“ wurden ein Dilatanz-Kriterium für Kristallgestein formuliert, das auf dem Stoffmodell von Hoek & Brown basiert. Dieses Kriterium schließt explizit die mechanische Schwächung eines Gebirgsbereiches durch mehr oder weniger dicht angeordnete Kluffstrukturen ein. Das Fluidruck-Kriterium wird dergestalt formuliert, dass ein fluiddruckgetriebenes Zugversagen ausgeschlossen ist. Für das Temperatur-Kriterium wird zunächst auf die Vorgabe des Standortauswahlgesetzes verwiesen. Darüber hinaus wird analysiert und eingeschätzt, in welcher Form eine Abweichung von dieser Vorgabe im Zuge der Sicherheitsuntersuchungen im Zusammenhang mit der Optimierung der Sicherheit und der Robustheit des Endlagersystems sinnvoll wäre.

Im Rahmen der Einlagerungsoption „überlagernder ewG“, bei der das kristalline Wirtsgestein überlagernde Sedimentgesteine entweder aus flachlagernden Salzen oder Tongesteinen die einschließende Wirkung übernehmen, wird auf die Kriterien verwiesen, die im Rahmen anderer Forschungsprojekte für diese Gesteine entwickelt wurden.

Die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist dann gewährleistet, wenn alle diesbezüglichen Kriterien unabhängig voneinander eingehalten sind. Dies schließt explizit auch die Kriterien für die geotechnischen Barrieren ein, die innerhalb eines ewG angeordnet sind, um dessen Durchörterungen abzudichten. Die angegebenen quantitativen Formulierungen sind als vorläufig anzusehen, da noch keinerlei Datenmaterial aus Erkundungen von potentiellen Endlagerstandorten in kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland vorliegt. Bei Vorlage entsprechender Kenntnisse sind die Quantifizierungen zu verifizieren und ggf. anzupassen.

## 7 Literatur

- Abbas, S. (2015). Rock mass classification systems. Rock mass classification systems. Gustav-Zeuner-Straße 1, Freiberg.
- AkEnd. (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Tech. rep., AkEnd.
- Alexander, R. (2009). The impact of a (hyper)alkaline plume on (fractured) crystalline rock, Proc. NEA-IGSC Workshop on cementitious materials in safety cases for geological repositories for radioactive waste: role, evolution and interaction. Brussels, 17-20th November, 2009. Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2012)3/REV, NEA/OECD, Paris, France.
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R. & Wolf, J. (2020a). Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit, Projekt RESUS. GRS-571, BGE TECHNOLOGY GMBH, BGR, GRS, Braunschweig.
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R. & Wolf, J. (2020b). Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit, Projekt RESUS. GRS-572, BGE TECHNOLOGY GMBH, BGR, GRS, Braunschweig.
- Armand G., Bumbieler F., Conil, N., de la Vaissière R., Bosgiraud, J.-M. & Vu, M.-N. (2017). Main outcomes from in situ thermo-hydro-mechanical experiments programme to demonstrate feasibility of radioactive high-level waste disposal in the Callovo-Oxfordian claystone. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9 (2017) 415-427.
- Artemieva, I. (1997). In-situ permeability of Hot Dry Rock. Fractured reservoirs, Nordic Petroleum Technology Series, 1, 99-124.
- Arzua, J., Alejano, L., & Walton, G. (2014). Strength and dilation of jointed granite specimens in servo-controlled triaxial test. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 69, 93-104.
- Barré, G., Truche, L., Bazarkina, E. F., Michels, R., & Dubessy, J. (2017). First evidence of the trisulfur radical ion S<sub>3</sub><sup>-</sup> and other sulfur polymers in natural fluid inclusions. *Chemical Geology*, 462, 1-14.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39, 185-216.
- Barton, N., Loset, F., Lien, R., & J., L. (1980). Application Of Q-System In Design Decisions Concerning Dimensions And Appropriate Support For Underground Installations. Proc. Int. Conf. Subsurface Space (S. 553-561). Pergamon Press.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236.
- Bath, A.H., Christofi, N., Neal, C., Philip, J.C., Cave, M., McKinley, I.G. & Berner, U. (1987). Trace element and microbial studies of alkaline groundwaters in Oman, Arabian Gulf – a natural analogue for cement porewaters, Nagra Technical Report NTB 87-16, Nagra, Wetingen, Switzerland.
- Bäckblom, G. (2008). Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses, Conrox AB, SKB Technical Report TR-08-08, Sweden.
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubart-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J.R. & Wolf, J. (2020). Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer steil lagernden Salzformation (S2), Projekt RESUS, Technischer Bericht, GRS-569, BGE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Braunschweig.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., et al. (2017). Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. FuE-Projekt KONEKD Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Bertuzzi, R. (2019). Revisiting rock classification to estimate rock mass properties, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11, pp. 494-510.

- Bielus, L. (1988). Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet granite in tension and compression. Thesis, Faculty of Graduate Studies of the University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
- Bieniawski, Z. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15, 335-344.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley & Son.
- Biot, M. (1955). Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, 26(2), 182-185.
- Biot, M., & Willis, D. (1957). The elastic coefficients of the theory of consolidation. *Journal of Applied Mechanics*, 594-601.
- BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Kühnlenz, T., Liu, W., Minkley, W., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Völkner, E. & Wolf, J. (2018). Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Project KOSINA, Synthesis Report (BGE TEC 2018-13), Peine.
- Branderbergh, S. & Wiborgh, M. (1982). Long-term changes. In: Rennerfelt, J. (ed.), SKBF/KBS Working Report SFR 81-10 in appendix (in Swedish).
- Brasser, T., Herbert, H.-J., Miehe, R., & Schmidt, G. (2008). Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Wirtsgesteine, Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften. Tech. rep., GRS, Braunschweig.
- Brunner, I., Plötze, M., Rieder, S., Zumsteg, A., Furrer, G., & Frey, B. (2011). Pioneering fungi from the Damma glacier forefield in the Swiss Alps can promote granite weathering. *Geobiology*, 9, 266-279.
- Cai, M., Kaiser, P., Tasaka, Y., & Minami, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 247-265.
- Cai, M., Kaiser, P., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H., & Minami, M. (2004a). Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 41, 833-847.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H, Tasaka, Y, & Minami, M. (2004b). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.* 41, pp. 3-19, Pergamon.
- Cerioti, G., Dalla-Rosa, M., Geloni, C., Guadagnini, A., & Porta, G. (2017). Quantification of CO<sub>2</sub> generation in sedimentary basins through Carbonate/Clays Reactions with uncertain thermodynamic parameters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Charles, R. (1958). Static fatigue of glass. *J. Appl. Phys.*, 29(11), 1549-1560.
- Charles, R. (1959). The strength of silica glasses and some crystalline oxides. *Proceedings of international conference on fracture* (S. 225-250). Cambridge: MIT Press.
- Chen, J., Wang, S., Ni, J., Azzam, R., & Fernández-Steegeer, T. (2017). An experimental study of the mechanical properties of granite after high temperature exposure based on mineral characteristics. *Engineering Geology*, 220(220), 234-242.
- Chi Fru, E., & Athar, R. (2008). In situ bacterial colonization of compacted bentonite under deep geological high-level radioactive waste repository conditions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, 499-510.
- Colwell, F. S., Delwiche, M. E., Chandler, D., Fredrickson, J. K., Yao, Q. J., McKinley, J. P., et al. (1997). Microorganisms from deep, high temperature sandstones: constraints on microbial colonization. *FEMS Microbiology Reviews*, 20, 425-435.
- Coudrain-Ribstein, A., Gouze, P., & de Marsily, G. (1998). Temperature-carbon dioxide partial pressure trends in confined aquifers. *Chemical Geology*, 1-2, 73-89.
- Cross, M. M., Manning, D. A., Bottrell, S. H., & Worden, R. H. (2004). Thermo-chemical sulphate reduction (TSR): experimental determination of reaction kinetics and implications of the observed reaction rates for petroleum reservoirs. *Organic Geochemistry*, 35, 393-404.
- Cruden, D.M. (1970). A theory of brittle creep in rock under uniaxial compression. *J Geophys. Res.* 75: 3431-3442.

- Cruden, D.M. (1971). The Form of the Creep Law for Rock under Uniaxial Compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 8: 105–126.
- Cruden, D.M. (1974). The static fatigue of brittle rock under uniaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 11: 67–73.
- Damjanac, B., & Fairhurst, C. (2010). Evidence for a Long-Term Strength Threshold in Crystalline Rock. *Rock Mech. Rock Eng.*, 43(5), 513-531.
- Dassanayake, A., Fujii, Y., Fukuda, D., & Kodama, J. (2014). Significant Differences in Effective Stress Coefficient for Rocks within Elastic Region and Peak and Residual Strengths. 8th Asian Rock Mechanics Symposium.
- DBETEC (2016). Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle; Gutachten. Gutachten, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Deere, D., Hendron, A., Patton, F., & Cording, E. (1967). Design of surface and near surface construction in rock. In *S. of Mining Engineers (Hrsg.)*, 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics: Failure and breakage of rock.
- Deissmann G., Ait Mouheb N., Martin C., Turrero, M.J., Torres, E., Kursten, B., Weetjens, E., Jacques, D., Cuevas, J., Samper, J., Montenegro, L., Leivo, M., Somervuori, M. & Carpen, L. (2021): Experiments and numerical model studies on interfaces. Final version as of 12.05.2021 of deliverable D2.5 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
- Detournay, E., & Cheng, H.-D. (1993). Fundamentals of Poroelasticity. In C. Fairhurst (Hrsg.). Pergamon Press.
- Drake, H. a., Heim, C., Reiners, P., Tillberg, M., Hogmalm, K., Dopson, M., et al. (2018a). Unprecedented 34S-enrichment of pyrite formed following microbial sulfate reduction in fractured crystalline rocks. *Geobiology*, 16, 556-574.
- Drake, H., & Ivarsson, M. (2018). The role of anaerobic fungi in fundamental biogeochemical cycles in the deep biosphere. *Fungal Biology Reviews*, 32, 20-25.
- Drake, H., Ivarsson, M., Tillberg, M., Whitehouse, M., & Kooijman, E. (2018b). Ancient Microbial Activity in Deep Hydraulically Conductive Fracture Zones within the Forsmark Target Area for Geological Nuclear Waste Disposal, Sweden. *geosciences*, 8.
- Dwiwedi, R., Goel, R., & Prasad, V. A. (2008). Thermo-mechanical properties of indian and other granites. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 45, 303-315.
- Eberhardt, E. (2010). Review: GSI and Hoek-Brown Procedure. Review: GSI and Hoek-Brown Procedure.
- Eberhardt, E. (2012). The Hoek–Brown Failure Criterion. *Rock Mech. Rock Eng.*, 45, 981-988.
- Eberhardt, E., Stimpson, B., & Stead, D. (1999). Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(2), 81-99.
- EndSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, Stand 06.10.2020, Berlin.
- Farough, A., Moore, D., Lockner, D., & Lowell, R. (2016). Evolution of fracture permeability of ultramafic rocks undergoing serpentinization at hydrothermal conditions: An experimental study. *AGU Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 44-55.
- Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M. & Risnes, R. (1992). Petroleum related rock mechanics. Elsevier Science Publisher, Amsterdam.
- Freiman, S. W. (2000). Fracture and the structure of silica. *Surface-Active Processes in Materials*, 25-38.
- Freiman, S. W. (1984). Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics, *Jour. of Geophys. Res.* 89, No B6, pp 4072-4076.
- Frey, B., Rieder, S. R., Brunner, I., Plötze, M., Koetzs, S., Lapanje, A., et al. (2010). Weathering-associated bacteria from the Damma glacier forefield: physiological capabilities and impact on granite dissolution. *Applied and environmental microbiology*, 76, 4788-4796.
- Grenet, L. (1899). Mechanical strength of glass. *Bull. Soc. Enc. Industr. Nat. Paris*, 4(5), 838-848.
- Heim, C., Lausmaa, J., Sjövall, P., Toporski, J., Dieing, T., Simon, K., et al. (2012). Ancient microbial activity recorded in fracture fillings from granitic rocks (Åspö Hard Rock Laboratory, Sweden). *Geobiology*, 10, 280-297.

- Heusermann, S. (2001). Beurteilung der geomechanischen Stabilität und Integrität von Endlagerbergwerken im Salzgebirge auf der Grundlage geologischer und ingenieurgeologischer Untersuchungen. *Geologische Beiträge Hannover*, 2, 159-174.
- Heusermann, S., Nipp, H.-K., Eickemeier, R., Fahland, S. & Preuss, J. (2007): Geomechanical integrity of waste disposal areas in the Morsleben repository. *Int. Conf. on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations (REPOSAFE)*, Nov. 6-9, 2007, Braunschweig.
- Heuze, F. (1983). High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks - a review. *Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr.*, 20(1), 3-10.
- Hillig, W., & Charles, R. (1965). Surfaces, Stress-Dependent Surface Reactions, and Strength. In V. Zackay (Hrsg.). New York: Wiley.
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses. *Géotechnique*, 33(3), 187-223.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock masses. *News Journal of ISRM*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E. (1998). Reliability of Hoek-Brown Estimates of Rock Mass Properties and their Impact on Design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 35(1), 63-68.
- Hoek, E. (2001). Rock mass properties for underground mines. In W. A. Hustrulid, & R. L. Bullock (Hrsg.). *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)*.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. (E. Hoek, Hrsg.)
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and Rocks*, 2, 1-13.
- Hoek, E., & Martin, C. (2014). Fracture initiation and propagation in intact rock - A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 287-300.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. *Proc. NARMS-TAC Conference*, 1, S. 267-273. Toronto.
- Hoek, E., Carter, T., & Diederichs, M. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. San Francisco, CA, USA: American Rock Mechanics Association.
- Hoek, E., Wood, D., & Shah, S. (1992). A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. *Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization*.
- Hökmark, H., Lönnqvist, M. & Fälth, B. (2010). T-H-M issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark, H., Fälth, B. & Wallroth, T. (2006). T-H-M couplings in rock. Overview of results of importance to the SR-Can safety assessment. SKB R-06-88, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hubbert, M., K. & Willis, D. G. (1972). Mechanics of Hydraulic Fracturing, In: Cook, T. D.: *Underground Waste Management and Environmental Implications*. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M18373C35>.
- Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F. & Plischke, I. (2003). Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Projekt Gorleben, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Hutcheon, I., & Abercrombie, H. (1990). Fluid-rock interactions in thermal recovery of bitumen, Tucker Lake pilot, Cold Lake, Alberta. In: *Prediction of Reservoir Quality Through Chemical Modeling*. American Association of Petroleum Geology Memoir 49 (eds IE Meshri, PJ Ortoleva), 161-170.
- Hutcheon, I., Abercrombie, H., & Krouse, H. (1990). Inorganic origin of carbon dioxide production in low temperature thermal recovery of bitumen: chemical and isotopic evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 165-171.
- Isherwood, D., Harrar, J., & Raber, E. (1982). Characterization of Climax Granite Ground Water. Tech. rep., LAWRENCE LIVERMORE LABORATORY, University of California, Livermore, California.
- Jaeger, J., & Cook, N. (1969). *Fundamentals of rock mechanics*. Barnes and Noble, New York, N.Y. and Methuen, London.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021). Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland, Technischer Bericht, BGETEC 2019-05, BGE TECHNOLOGY, Peine.
- Jobmann, M., & Meleshyn, A. (2015). Evaluation of temperature-induced effects on safety-relevant properties of clay host rocks with regard to HLW/SF disposal. *Mineralogical Magazine*, 79(6), 1389-1395.

- Jobmann, M., Becker, D., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., et al. (2016). Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., & Polster, M. (2015). Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tongestein. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technical Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Kahnt, M. (2016). Verwertungsmöglichkeiten von Ausbauasphalt für Asphaltsschichten im Straßenbau, Diplomarbeit, Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Glauchau.
- Kashefi, K., & Lovley, D. R. (2004). Extending the upper temperature limit for life. *Science*, 301, 934.
- Kaur, P., Chaudhri, N., Hofmann, A., Raczek, I., Okrusch, M., Skora, S., et al. (2012). Two-Stage, Extreme Albitization of A-type Granites from Rajasthan, NWIndia. *Journal of Petrology*, 53(5), 919-948.
- Kinzelbach, W. (1992). Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser (2. Ausgabe Ausg.). Oldenbourg Verlag.
- Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K. & Vogel, P. (2012). Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bd. GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- Konevnik, Y., Zakharova, E., Martynov, K., Andryushchenko, N., & Proshin, I. (2017). Influence of temperature on the sorption properties of rocks from the Nizhnekansky massif. *Radiochemistry*, 59, 313-319.
- Koskinen, K. (2014). Effects of cementitious leachates on the EBS. Posiva Report 2013-04, Posiva, Olkiluoto, Finland.
- Krone, J., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Filbert, W., Heusermann, S., Kreienmeyer, M., Mönig, J., Tholen, M., Weber, J.R. & Wolf, J. (2008). Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, Projekt ISIBEL, Abschlussbericht TEC-09-2008-AB, DBE TECHNOLOGY, Peine.
- Kühle, T., Zude, F., & Lührmann, L. (1996). Das eindimensionale Transportprogramm CHET1 unter Berücksichtigung der Sorption nach dem Kd-Konzept. GRS-Bericht, GRS, Braunschweig.
- Kumari, W., Ranjith, P., Perera, M., Shao, S., Chen, B., Lashin, A. A., et al. (2017). Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermalenergy extraction. *Geothermics*, 65, 44-59.
- Lau, J.S.O., Gorski, B., Conlon, B. & Anderson, T. (2000). Long-term loading tests on saturated granite, Ontario Power Generation, NWM division report no. 06819-REP-01300-10016-R00.
- Leon Vargas, R. P., Jobmann, M. Seidel, D. & Wunderlich, A. (2021). Analysen zur Integrität technischer und geotechnischer Barrieren für Endlager in Kristallinstandorten in Deutschland, Forschungsprojekt CHRITA-II, Technischer Bericht BGETEC 2021-XX, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Leupin, O.X., Smith, P., Marschall, P., Johnson, L., Savage, D., Cloet, V., Schneider, J. & Senger, R. (2016): High-level waste repository-induced effects. NTB14-13, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz.
- Lewis, R.W. & Schrefler, B.A. (1987). The finite element method in the deformation and consolidation of porous media, 1st edn. Wiley, Chichester.
- Lin, L.-H., Hall, J., Lippmann-Pipke, J., Ward, J. A., Sherwood Lollar, B., DeFlaun, M., Rothmel, R., Moser, D., Gihring, T. M., Mislouack, B. & Onstott, T. C. (2005). Radiolytic H<sub>2</sub> in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, AGU and the Geochemical Society, Vol. 6 No. 7, Q07003, doi:10.1029/2004GC000907, ISSN: 1525-2027.
- Liu, W., Knauth, M., Eickemeier, R., Fahland, S., Popp, T. & Minkley, W. (2018). TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

- Machel, H. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings, old and new insights. *Sedimentary Geology*, 140, 143-175.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 64, 55-65.
- Martin, C. (1997). The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. *Can. Geotech. J.*, 34, 698-725.
- Maßmann, J. & Ziefle, G. (2017). Integritätsnachweis geologische Barriere. In: Jobmann M. (Koordinator), Burlaka, V., Herold, P., Kuate Simo, E., Maßmann, J., Meleshyn, A., Rübel, A., Ziefle, G.: Projekt ANSICHT: Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle. Methode und exemplarische Berechnung zum Sicherheitsnachweis, GRS, BGR, DBETEC, TEC-29-2016-AB.
- Mäder, U.K., Fierz, T., Frieg, B., Eikenberg, J., Rüthi, M., Albinsson, Y., Möri, A., Ekberg, S. & Stille, P. (2006). Interaction of hyperalkaline fluid with fractured rock: Field and laboratory experiments of the HPF project (Grimsel Test Site, Switzerland), *Journal of Geochemical Exploration* 90, 68-94.
- Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., J., B., et al. (2010). Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. Abschlussbericht, IfG, Leipzig.
- Mönig, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Fahland, S., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Weber, J.R. & Wolf, J. (2020). Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG, Technischer Bericht, GRS-567, BGE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Braunschweig.
- Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., Peiffer, F., et al. (2011). Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Bericht zum Arbeitspaket 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-Bericht, GRS, Braunschweig.
- Moore, D., Morrow, C., & Byerlee, J. (1983). Chemical reactions accompanying fluid flow through granite held in a temperature gradient. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 47, 445-453.
- Morrow, C., Lockner, D., Moore, D., & Byerlee, J. (1981). Permeability of granite in a temperature gradient. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 3002-3008.
- Morrow, C., Moore, D., & Byerlee, J. (1985). Permeability changes in crystalline rocks due to temperature: effects of mineral assemblage. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 44.
- Morrow, C., Moore, D., & Lockner, D. (2001). Permeability reduction in granite under hydrothermal conditions. *Journal of Geophysical Research*, 106(B12), 30551-30560.
- Moyce, E.B.A., Rochelle, C., Morris, K., Milodowski, A.E., Chen, X., Thornton, S., Small, J.S., Shaw, S. (2014). Rock alteration in alkaline cement waters over 15 years and its relevance to the geological disposal of nuclear waste. *Applied Geochemistry* 50, 91-105.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020). Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Projekt CHRISTA-II, Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Necib, S., Linard, Y., Crusset, D., Michau, N., Daumas, S., Burger, E., et al. (2016). Corrosion at the carbon steel-clay borehole water and gas interfaces at 85°C under anoxic and transient acidic conditions. *Corrosion Science*, 111, 242-258.
- Nicholson, W., Munakata, N., Horneck, G., Melosh, H., Melosh, J., & Setlow, P. (2000). Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64, 548-572.
- Nishimoto, S., & Yoshida, H. (2010). Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effects of dissolution and precipitation. *Lithos*, 115, 153-162.
- Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., & Yasue, K. E. (2016). Thermal Constraints on Clay Growth in Fault Gouge and Their Relationship with Fault-zone Evolution and Hydrothermal Alteration. Case Study of Gouges in the Kojaku Granite, Central Japan. *Clays and Clay Minerals*, 64, 86-107.
- Parkes, R., Linnane, C., Webster, G., Sass, H., Weightman, A., Hornibrook, E., et al. (2011). Prokaryotes stimulate mineral H<sub>2</sub> formation for the deep biosphere and subsequent thermogenic activity. *Geology*, 39, 219-222.

- Pastina, B., Lehtikoinen, J. & Puigdomenech, I., (2012). Safety case approach for a KBS-3 type repository in crystalline rock. In: NEA (2012). Cementitious materials in safety cases for geological repositories for radioactive waste: Role, evolution and interactions, NEA/RWM/R(2012)3/REV, 120-124.
- Pedersen, K. (1997). Microbial life in deep granitic rock. *FEMS microbiology reviews*, 20, 399-414.
- Plümper, O., & Putnis, A. (2009). The Complex Hydrothermal History of Granitic Rocks. Multiple Feldspar Replacement Reactions under Subsolvus Conditions. *Journal of Petrology*, 50, 967-987.
- Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grader, A., & Halleck, P. (2003). Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*, 30(20, 2020).
- Posiva (2012). Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07, Eurajoki.
- Potter, J. (1978). Experimental Permeability Studies at Elevated Temperature and Pressure of Granitic Rocks. Thesis, Stanford University, Stanford, CA.
- Potyondy, D. O. (2007). Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock, *Int. Journ. for Rock Mech. and Min. Sci.* 44, pp 677-691, Elsevier.
- Pusch, R. (1983). Stability of bentonite gels in crystalline rock - Physical aspects. University of Lulea, Study on behalf of SKBF/KBS, Sweden.
- Radenberg, M. (2014). Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen, Schlussbericht, Deutsches Asphaltinstitut e. V. - DAI, Bochum.
- Ranjith, P., Fourar, M., Pong, S., Chian, W., & Haque, A. (2004). Characterization of fractured rocks under uniaxial loading states. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 3.
- Rempe, N.T. (2014). Geologic analogues for hot waste and for radionuclide releases. Proc. Salt Club Workshop, Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt, NEA/RWM/R (2013)10, S. 99-103, Braunschweig.
- Romaine, A., Sabot, R., Jeannin, M., Necib, S. & Refait, Ph. (2013). Electrochemical synthesis and characterization of corrosion products on carbon steel under argillite layers in carbonated media at 80 °C. – *Electrochimica Acta* 114: 152– 158.
- Rutqvist, J. (2014). Fractured rock stress-permeability relationships from in situ data and effects of temperature and chemical-mechanical couplings. *Geofluids*, 15, 48-66.
- Saiang, C. & Miskovsky, K. (2012). Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types - a laboratory study. In Q. \. (eds) (Hrsg.), *Harmonising Rock Engineering and the Environment*. London: Taylor & Francis Group.
- Sandström, B., & Tullborg, E.-L. (2009). Episodic fluid migration in the Fennoscandian Shield recorded by stable isotopes, rare earth elements and fluid inclusions in fracture minerals at Forsmark, Sweden. *Chemical Geology*, 266, 126-142.
- Sari, M. (2010). A simple approximation to estimate the Hoek-Brown parameter 'mi' for intact rocks, *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – Zhao, Labiouse, Dudt & Mathier (eds)*, © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-58654-2
- Schmidtke, R.H. & Lajtai, E.Z. (1985). Long-term strength of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.* 22(6), pp 461-465.
- Shao, S., Ranjith, P., Wasantha, P., & Chen, B. (2015). Experimental and numerical studies on the mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite at high temperatures: An application to geothermal energy. *Geothermics*, 54, 96-108.
- Simon, K. (1990). Hydrothermal alteration of Variscan granites, southern Schwarzwald, Federal Republic of Germany. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 105, 177-196.
- SKB. (2010). Design and production of the KBS 3 repository. Technical Report, SKB, Stockholm.
- Slobodkin, A. I., Tourova, T. P., Kuznetsov, B. B., Kostrikina, N. A., Chernyh, N. A., & Bonch-Osmolovskaya, E. A. (1999). Thermoanaerobacter siderophilus sp. nov., a novel dissimilatory Fe(III)-reducing, anaerobic, thermophilic bacterium. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 49, 1471-1478.
- Smith, J., & Ehrenberg, S. (1989). Correlation of carbon dioxide abundance with temperature in clastic hydrocarbon reservoirs: relationship to inorganic chemical equilibrium. *Marine and Petroleum Geology*, 6, 129-135.

- Soler, J.M., Pflingsten, W., Paris, B., Mäder, U.K., Frieg, B., Neall, F., Källvenius, G., Yui, M., Yoshida, Y., Shi, P. & Rochelle, C.H.A. (2006). HPF-Experiment: modelling report. Nagra Technical Report NTB-05-01, Nagra, Wetztingen, Switzerland.
- Soler, J.M. & Mäder, U. (2010). Cement-rock interaction: Infiltration of a high-pH solution into a fractured granite core, *Geologica Acta*, Vol. 8, No. 3, pp. 221-233, DOI:10.1344/105.000001531.
- StandAG. (2017). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG). Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG). Bonn.
- Stober, I., & Bucher, K. (2015). Hydraulic conductivity of fractured upper crust. Insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. *Geofluids*, 15, 161-178.
- Stober, I., Zhong, J., Zhang, L., & Bucher, K. (2016). Deep hydrothermal fluid-rock interaction: the thermal springs of Da Qaidam. *Geofluids*, 16, 711-728.
- Takai, K., Nakamura, K., Toki, T., Tsunogai, U., Miyazaki, M., Miyazaki, J., et al. (2008). Cell proliferation at 122°C and isotopically heavy CH<sub>4</sub> production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, S. 10949-10954.
- Tan, X., & Konietzky, H. (2017). Numerical Study of Biot's Coefficient Evolution During Failure Process for Aue Granite Using an Empirical Equation Based on GMR Method. *Rock Mech. Rock Eng.*
- Tan, X., Konietzky, H., & Frühwirt, T. (2015). Experimental and Numerical Study on Evolution of Biot's Coefficient During Failure Process for Brittle Rocks. *Rock Mech. Rock Eng.*, 48, 1289-1296.
- Terzaghi, K., & Fröhlich, O. (1936). *Theorie der Setzung von Tonschichten. Eine Einführung in die analytische Tonmechanik.* Franz Deuticke, Wien.
- Thiedau, J., Maßmann, J., Guevara, C., Weihmann, S. & Alfarra, A. (2021). Analysen zur Integrität von geologischen Barrieren von Endlagersystemen im Kristallin, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Ergebnisbericht, BGR Hannover.
- Truche, L., Bazarkina, E. F., Barré, G., Thomessot, E., Berger, G., Dubessy, J. & Robert, P. (2014). The role of S-3 ion in thermochemical sulphate reduction: Geological and geochemical implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 396, 190-200.
- Truche, L., Berger, G., Destigneville, C., Pages, A., Guillaume, D., Giffaut, E., et al. (2009). Experimental reduction of aqueous sulphate by hydrogen under hydrothermal conditions: implication for the nuclear waste storage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 4824-4835.
- Truche, L., Jodin-Caumon, M.-C., Lerouge, C., Berger, G., Mosser-Ruck, R., Giffaut, E., et al. (2013). 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*, 351, 217-228.
- Vásárhelyi, B., Kovács, L., & Török, Á. (2016). Analysing the modified Hoek–Brown failure criteria using Hungarian granitic rocks. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 2, 131-136.
- Wang, F., & Konietzky, H. (2019). Thermo-Mechanical Properties of Granite at Elevated Temperatures and Numerical Simulation of Thermal Cracking. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Weber, A., & Jørgensen, B. B. (2002). Bacterial sulfate reduction in hydrothermal sediments of Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico. *Deep-Sea Research I*, 49, 827-841.
- Weisenberger, T. & Bucher, K. (2010). Zeolites in fissures of granites and gneisses of the Central Alps. *Journal of metamorphic Geology*, 28, 825-847.
- Weitkamp, A., Frenzel, B., Krumbholz, M., Mrugalla, S. & Sönke, J. (2021). CHRISTA-II – Beschreibung des generischen geologischen Modells für das Endlagersystem „überlagernder ewG“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover.
- White, A., Schulz, M., Lowenstern, J., Vivit, D., & Bullen, T. (2005). The ubiquitous nature of accessory calcite in granitoid rocks: Implications for weathering, solute evolution, and petrogenesis. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 69(6), 1455-1471.
- Wiederhorn, S., & Bolz, L. (1970). Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass. *Journal of The American Ceramic Society*, 53(10).
- Xiao, Q., Amrani, A., Sun, Y., He, S., Cai, C., Liu, J., et al. (2018). The effects of selected minerals on laboratory simulated thermochemical sulfate reduction. *Organic Geochemistry*, 122, 41-51.
- Xu, X.-L., Gao, F., Shen, X.-M., & Xie, H.-P. (2008). Mechanical characteristics and microcosmic mechanisms of granite under temperature loads. *J. China Univ. Mining & Technol.*, 18, 413-417.

- Yasahura, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Lee, D., Nakashima, S., & Kishida, K. (2011). Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model. *Applied Geochemistry*, 26, 2074-2088.
- Yuguchi, T., Sasao, E., Ishibashi, M., & Nishiyama, T. (2015). Hydrothermal chloritization processes from biotite in the Toki granite, Central Japan. Temporal variations of the compositions of hydrothermal fluids associated with chloritization. *American Mineralogist*, 100(5-6), 1134-1152.
- Zimmerman, R., Wilson, M., Board, M., Hall, M., & Schuch, R. (1985). Thermal-Cycle Testing of the G-Tunnel Heated Block. Proceedings of the 26th US symposium on rock mechanics. Rapid City: AA Balkema.
- Zuo, J., Liu, H., & Li, H. (2015). A theoretical derivation of the Hoek-Brown failure criterion for rock materials. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 361-366.

## Abkürzungsverzeichnis

AE	Akustische Emissionen
ALZ	Auflockerungszone
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (Nationale Agentur für das Management radioaktiver Abfälle)
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BSK	Brennstabkockille
CTRW	Continuous Time Random Walk
DFN	Discrete Fracture Network
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
DOMPLU	Dome Plug (In-situ-Experiment im Äspö Untertagelabor)
DOPAS	Full scale Demonstration Of Plugs And Seals (Europäisches Forschungs-Verbundprojekt)
DTE	Differential Thermal Expansion
ESDRED	Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (Europäisches Forschungs-Verbundprojekt)
ESP	Enhanced Sealing Project (In-situ-Experiment im Untertagelabor in Kanada)
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events and Processes
GSI	Geological Strength Index
IAEA	International Atomic Energy Agency
JCond	Joint Condition
KBS-3	Kärnbränslesäkerhet nuclear fuel Safety
KONEKD	Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente in Kristallingestein in Deutschland (Forschungsprojekt)
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
NEA	Nuclear Energy Agency (NEA)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
POPLU	Deposition tunnel end plug experiment (In-situ-Experiment in ONKALO, Finnland)
Q-System	Rock Mass Quality System / Tunnel Quality Index
ReZ	Repräsentative ewG-Zelle
REV	Repräsentative Elementarvolumen
RGI	Radiologischer Geringfügigkeits-Index
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Mass Designation
SEM	Scanning Electron Microscope (Rasterelektronenmikroskop)
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schwedisches Entsorgungsunternehmen für radioaktive Abfälle)
StandAG	Standortauswahlgesetz
THM	Thermo-Hydro-Mechanisch

TSR	Thermochemische Sulfat-Reduktion
TSX	Tunnel Sealing Experiment (In-situ-Experiment im Untertagelabor in Kanada)
TU	Technische Universität
UDEC	Universal Distinct Element Code (Itasca company)

## ANHANG

Übersicht über gängige Gesteins-Klassifizierungssysteme, die als Alternative zum GSI-System angesehen werden können.

### Das RQD-System

Im Rahmen dieses Klassifizierungsansatzes wird der Kerngewinn bei Kernbohrungen in Prozent angegeben, wobei nur Kernstücke gewertet werden, die mindestens 10 cm lang sind. Der RQD gibt also an, welcher Prozentsatz des Kerngewinns in Stücken mit Längen von 10 cm oder mehr gewonnen wurde. Der RQD ist also ein Maß für den Grad der Klüftigkeit eines Gebirges mit dem Ziel, die „Qualität“ eines Gebirges hinsichtlich seiner Stabilität zu bewerten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass bei großer Anisotropie der Gebirgsspannungen bei entsprechender Orientierung der Bohrungen ein signifikantes Disking auftreten kann. Dies kann dazu führen, dass kein Kerngewinn möglich ist, obwohl keine Klüfte vorhanden sind.

RQD	Rock Mass Quality
< 25	Very poor
25 – 50	Poor
50 – 75	Fair
75 – 90	Good
99 – 100	Excellent

Tab. A.1:  
Qualitätsklassifizierung gemäß dem RQD-Index  
(Deere et al. 1967).

Ein Nachteil des RQD-Index ist beispielsweise, dass lediglich der Grad der Klüftung, nicht aber die Festigkeit des ungestörten Gesteins berücksichtigt wird. Das ist auch ein wesentlicher Grund warum das RQD-System niemals als einziges angewendet werden sollte.

### Das RMR-System (JCond<sub>89</sub>)

Das geomechanische Klassifizierungssystem „Rock Mass Rating“ (RMR) wurde von Bieniawski (1973) erstmals veröffentlicht. In den Folgejahren erfolgten signifikante Erweiterungen die in Bieniawski (1989) dargestellt sind. In der 89-ger Version werden 6 Parameter verwendet, um ein Gebirge zu klassifizieren.

1. Die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins
2. Der RQD-Index
3. Die Kluftabstände
4. Die Eigenschaften der Klüfte (Kluftweite, Rauigkeit, Füllungsgrad)
5. Die Grundwasserbeschaffenheit (Fließgeschwindigkeit, Druck, Verbindung zu oberflächennahen Grundwässern)
6. Die Orientierung der Klüfte

Die ersten fünf Parameter werden quantifiziert und in jeweils fünf Wertebereiche eingeteilt und bekommen zusätzlich noch einen Gewichtungsfaktor bezogen auf ihre jeweilige Bedeutung für die Eigenschaftsbewertung des Gebirges. Der sechste Parameter geht lediglich qualitative in die Bewertung ein. Die Bewertung der einzelnen Parameter werden anschließend zu einem Wert für den RMR zusammengefasst. Dieser RMR-Wert gibt an, zu welcher der vorher definierten Gebirgsklassen (Sehr gut, gut, akzeptabel, schlecht, sehr schlecht) das Gebirge zuzuordnen ist und erlaubt somit eine Einschätzung der Qualität hinsichtlich seiner Stabilität. Für eine detailliertere Beschreibung des Bewertungssystems wird auf Bieniawski (1989) verwiesen.

## Das Q-System

Der sogenannte „Tunneling Quality Index“ (Q) ist ein Klassifizierungssystem zur Einschätzung des notwendigen Ausbaus in Tunnelauffahrungen (Barton et al. 1974). Das Q-System ist ein quantitatives Klassifizierungssystem auf Basis von Berechnungen zur Gebirgsqualität. Auch das Q-System wurde in den Folgejahren weiterentwickelt, um die Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern (Barton et al. 1980 und 2002). Der Wert für Q lässt sich gemäß folgender Gleichung berechnen.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (A.1)$$

wobei

<i>RQD</i>	=	Rock Quality Designation
<i>J<sub>n</sub></i>	=	Joint set number
<i>J<sub>r</sub></i>	=	Joint roughness number
<i>J<sub>a</sub></i>	=	Joint alteration number
<i>J<sub>w</sub></i>	=	Joint water reduction factor
<i>SRF</i>	=	Stress Reduction Factor

Eine Deutung der Faktoren lässt sich wie folgt angeben:

Der erste Quotient (*RQD/J<sub>n</sub>*) repräsentiert in erster Näherung die Blockgröße des betrachteten Gebirgsbereiches. Der zweite Quotient (*J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>*) beschreibt die Reibungscharakteristika der Klüfte im betrachteten Gebirgsbereich. Der dritte Quotient (*J<sub>w</sub>/SRF*) repräsentiert die Spannungssituation im betrachteten Gebirgsbereich. Dieser Quotient ist der komplizierteste und am meisten diskutierte empirische Faktor, da er verschiedene Dinge vereint: den Einfluss des Spannungszustandes in brüchigen und geblockten Gestein sowie in deformierbarem Gestein und Schwächezonen. Das Q-System hat 9 unterschiedliche Qualitätsklassen von extrem schlecht bis extrem gut.



**BGE TECHNOLOGY GmbH**

**Eschenstraße 55**

**31224 Peine – Germany**

**T + 49 5171 43-1520**

**F + 49 5171 43-1506**

**[info@bge-technology.de](mailto:info@bge-technology.de)**

**[www.bge-technology.de](http://www.bge-technology.de)**