
**Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal**

**Entwicklung und Fundierung der Anforderung
„Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“**



Mosaik im Alfred-Benz-Haus © Geozentrum Hannover

Gutachten im Auftrag des AkEnd

TU- Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Dezember 2002

**Univ. Prof. Dr.- Ing. habil. K.-H. Lux – Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Erzstraße 20, 38678 Clausthal – Zellerfeld – Tel.: 05323/ 72 2242 – Telefax: 05323/ 72 2341**

**Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal**

**Entwicklung und Fundierung der Anforderung
„Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“**

Gutachten im Auftrag des AkEnd

TU- Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Dezember 2002

(Dipl.-Ing. S. Eberth)

(Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K-H. Lux)

**Univ. Prof. Dr.- Ing. habil. K.-H. Lux – Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Erzstraße 20, 38678 Clausthal – Zellerfeld – Tel.: 05323/ 72 2242 – Telefax: 05323/ 72 2341**

Entwicklung und Fundierung der Anforderung:

„Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“

Inhaltsverzeichnis

1	Grundsätzliche Überlegungen zur Operationalisierung der Anforderung “Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten”.....	1
1.1	Begründung der Anforderung und grundlegender Ansatz zur Bearbeitung	1
1.2	Hypothesen zu rissbildungsrelevanten Eigenschaften von Gesteinen	12
1.3	Ableitung von Indikatoren und Kriterien.....	17
1.4	Fazit und erster Vorschlag für die Kriterienimplementierung.....	19
2	Kriterienbezogene Sachverhalte.....	23
2.1	Kriterium K1: Gebirgspermeabilität gleich Gesteinspermeabilität.....	23
2.2	Kriterium K2: Barrierenwirkung des Gesteins bekannt auch im Größenbereich der Gebirgsformation und bei geogener Vorbeanspruchung	31
2.3	Kriterium K3: Das Gestein sollte unter in situ- Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen	38
2.4	Kriterium K4: Klüfte/ Risse werden bei Beanspruchungsinversion geohydraulisch wirksam verschlossen.....	55
2.5	Kriterium K5: Klüfte/ Risse im Gestein werden nach der Rissschließung geomechanisch wirksam verheilt	66
3	Formulierung von kriterienbezogenen Bewertungsmaßstäben.....	71
3.1	Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K1: Gebirgspermeabilität gleich Gesteinspermeabilität.....	71
3.2	Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K2: Barrierenwirkung des Gesteins bekannt auch im Größenbereich der Gebirgsformation und bei geogener Vorbeanspruchung	74

3.3	Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K3: Das Gestein sollte unter in situ- Bedingungen geogen eine plastisch- viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen	77
3.4	Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K4: Klüfte/ Risse werden bei Beanspruchungsinversion geohydraulisch wirksam verschlossen.....	81
3.5	Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K5: Klüfte/ Risse im Gestein werden nach der Risschließung geomechanisch wirksam verheilt.....	84
4	Vorschlag zur Implementierung der Anforderung geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten in das Auswahlverfahren	88
5	Literaturverzeichnis.....	96



AkEnd / AG Kriterien

1 Grundsätzliche Überlegungen zur Operationalisierung der Anforderung “Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten”

1.1 Begründung der Anforderung und grundlegender Ansatz zur Bearbeitung

Auswahlverfahren und Anforderungen an das Gebirge

Im Rahmen der Entwicklung eines Standortsuchverfahrens für ein Endlager für radioaktive Abfälle besteht die grundlegende Zielsetzung darin, ausgehend von einer sog. weißen Deutschlandkarte (= keine geologischen Vorfestlegungen, z.B. Wirtsgesteine) über wohldefinierte flächen- bzw. raumbezogene und kriteriengesteuerte Einengungsprozesse letztendlich Standorte mit einer für die Abfallendlagerung günstigen geologischen Gesamtsituation innerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Deutschland aufzufinden. Dabei sind mittels des in seinem Ablauf und seinen Inhalten (Kriterien, Grenzwerte) vor Verfahrensbeginn festgelegten Einengungsprozess sukzessive auf der Grundlage geowissenschaftlicher (und in Verbindung auch mit sozialwissenschaftlichen) Anforderungen zunächst entsprechende Gebiete, nachfolgend Teilgebiete und schließlich Standortregionen sowie Standorte zu identifizieren und zwar zunächst aufgrund bereits bestehender Kenntnisse zum geotektonischen Aufbau des Untergrundes in Deutschland, d.h. ohne zusätzliche Erkundungen vor Ort, insbesondere ohne Erkundungsbohrungen (Stichwort: Schreibtischkenntnisse). Erst in einer weiteren Einengungsphase sind dann unter Einbeziehung von Übertage-Erkundungsmaßnahmen ausgewählte Standorte zu charakterisieren und über einen Abwägungsprozess z.B. prioritär für weitere untertägige Untersuchungen zu reihen. Bild 1.1 zeigt die entwickelte Verfahrensstruktur mit Stand April 2002.

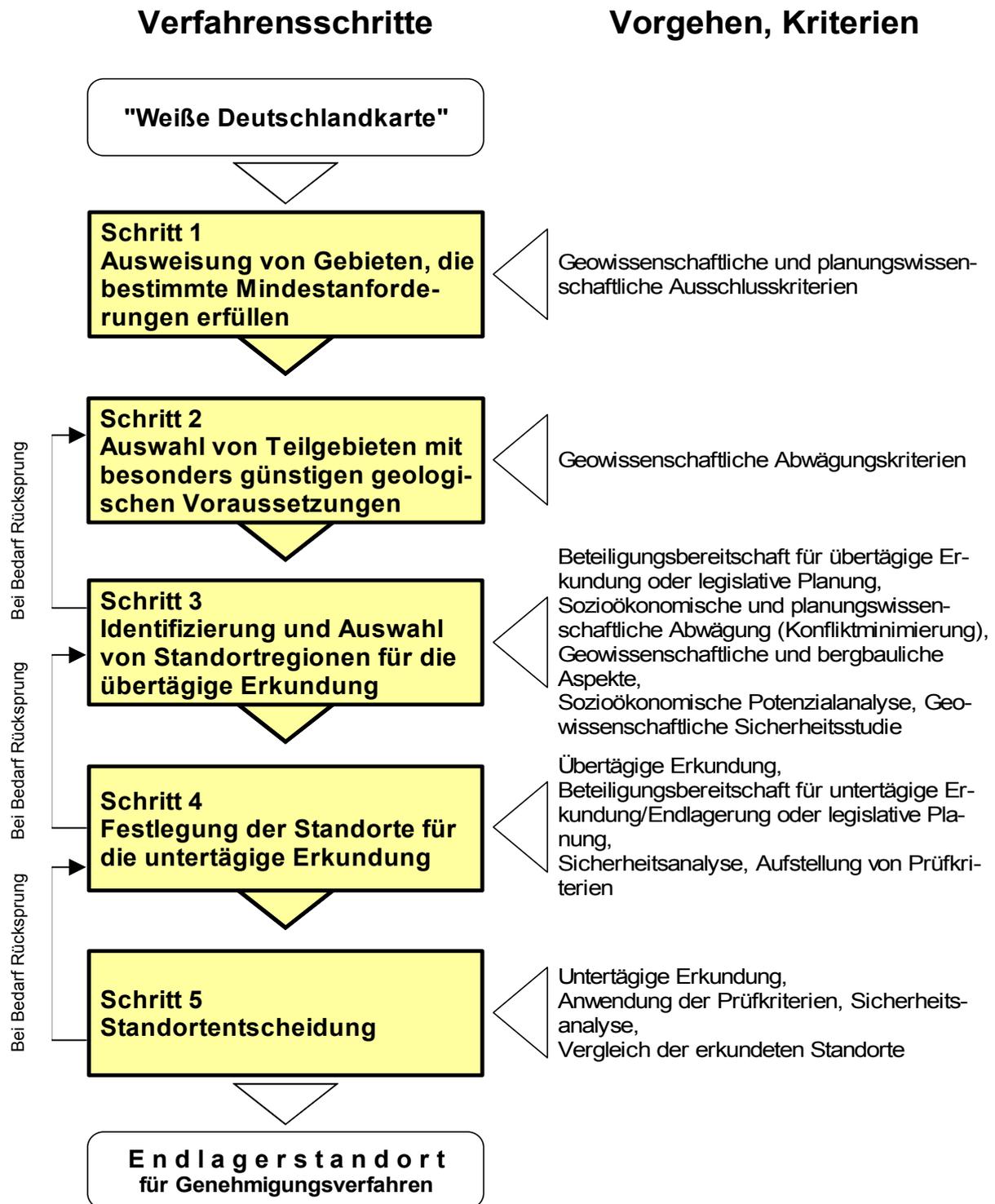


Bild 1.1: Verfahrensstruktur Stand April 2002



Im Hinblick darauf, dass nach Ablagerung der Abfälle und Stilllegung des Endlagers Schadstofffreisetzungen aus dem tiefen geologischen Untergrund in die Biosphäre über die Migration fluider Phasen als Löse- und Transportmittel auf primär im Gebirge bereits vorhandenen sowie auf sekundär durch den technogenen Eingriff (Bau und Betrieb des Endlagers) oder durch zukünftige geogene Einwirkungen induzierten Wegsamkeiten erfolgen können, erscheint eine günstige geologische Gesamtsituation u.a. auch nur dann gegeben, wenn das anstehende und aufgrund seiner hinreichend geringen Permeabilität als ***einschlusswirksamer Gebirgsbereich*** (auch ***geologische Barriere im engeren Sinn nach Hartmann (1997)***) deklarierte Gebirge prinzipiell eine ***nur geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten*** aufweist. Dabei sind sowohl grundsätzliche Gesteinseigenschaften wie auch die Relation zwischen schädigungsfreier Gesteinsbeanspruchbarkeit und vorhandener sowie im Lauf der Zeit zu erwartender Gesteinsbeanspruchung in Betracht zu ziehen.

Die Spezialisierung einer eher globalen Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* in Indikatoren und die weiterführende Umsetzung in qualitativ oder sogar quantitativ fassbare Kriterien zur Kondensierung anforderungsbezogener Eigenschaften im Hinblick auf die inhaltliche Gestaltung der Ausschluss- bzw. Abwägungsprozesse muss damit sowohl gesteinsbezogene wie beanspruchungsbezogene Aspekte umfassen, wobei es allerdings standortunabhängig nicht möglich erscheint, eine konkrete Beanspruchungsintensität anzugeben.

Grundlegender Ansatz

Grundlage für die Ausarbeitung der Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* ist der Ansatz, dass die Wegsamkeiten, die eine Migration von Fluiden im und durch das Gebirge hindurch hin zu oberflächennahen Grundwasserleitern ermöglichen, auf vernetzten durchflusswirksamen Porenräumen im Gesteinsgefüge beruhen und die Porenräume einerseits gesteinstypabhängig und andererseits formations-/ ortsabhängig in unterschiedlicher Intensität und Ausbildung vorliegen. Der Betrachtungsschwerpunkt wird daher auf die grundsätzlichen Mechanismen der Ausbildung von Porenräumen in verschiedenen Gebirgsformationen unter geogenen und technogenen Bedingungen gelegt. Unter Porenräumen werden hier zunächst unabhängig von ihrer Form und ihrer Entstehung jegliche Hohlräume im (mineralischen) Gesteinsgefüge verstanden und integral als Porosität des Gesteins bezeichnet. Eine



Fluidmigration unter Wirkung eines fluidbezogenen Potentialfeldes ist bei näherem Betrachten dann jedoch nur in den miteinander verbundenen (vernetzten) Porenräumen möglich, so dass im Hinblick auf die Gesteinsdurchlässigkeit eine totale und eine effektive Porosität zu unterscheiden sind. Grundsätzlich ist einerseits eine nicht hinreichend geringe Primärpermeabilität als Ausschlussbedingung anzusehen, während andererseits auch eine nicht hinreichend reversible Sekundärpermeabilität dann eine Ausschlussbedingung darstellt, wenn aufgrund technogener Beanspruchungen im Barrieregebirge unvermeidbar Risse entstanden sind mit der Folge einer Zunahme der Gebirgspermeabilität, die nachfolgend z.B. im Hinblick auf die geohydraulische Wirksamkeit der Abdichtungsmaßnahmen (geotechnische Barrieren) auch wieder rückgebildet werden müssen.

Abdichtungsmaßnahmen sind beispielsweise die Anordnung von Streckendämmen sowie Schacht- und Bohrlochverschlüssen. Sie bestehen jeweils aus der Abdichtung des offenen Grubenbauquerschnitts, der möglicherweise aufgelockerten Konturzone des umgebenden Gebirges und der Kontaktzone zwischen Gebirge und technischer Konstruktion. Die wesentliche Eigenschaft, die eine derartige Abdichtung im Hinblick auf den Langzeitsicherheitsnachweis kennzeichnet, ist die hydraulische Leistungsfähigkeit oder mit anderen Worten der Strömungswiderstand, den die Abdichtung als Verbundkonstruktion dem Vordringen von salinaren Lösungen entgegensetzt. Entscheidend ist dabei die Neigung des konturnahen Gebirges zur Bildung von Wegsamkeiten, da eine in ihrem bautechnischen Teil noch so qualitativ hochwertige Querschnittsabdichtung ihre Aufgabe nicht oder nur unzureichend erfüllt, wenn die salinaren Lösungen über das benachbarte und aufgelockerte Gebirge vordringen (→ Umläufigkeit). Für die rechnerische Modellierung der Schadstoffausbreitung im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises ist damit bei gleicher Qualität der bautechnischen Abdichtungsstruktur der Strömungswiderstand der Abdichtungsmaßnahme (geotechnische Barriere) um so größer, je geringer die Gebirgsauflockerung ist und je schneller aufgelockerte Konturzonen verheilen.

Dieser in die rechnerische Modellierung einzubringende Strömungswiderstand ist zeitbezogen aus geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Analysen für die jeweilige Abdichtungsmaßnahme abzuleiten. Ob diese Quantifizierung gelingt, ist gegenwärtig noch zukünftigen Forschungsarbeiten zu überlassen.



Eine vorsorglich bei der Standortauswahl bereits bedachte möglichst geringe Neigung des Barrieregebirges zur Bildung von Wegsamkeiten ist somit allerdings bereits grundsätzlich eine günstige Voraussetzung für die Gewährleistung der hydraulischen Wirksamkeit von geologischen und geotechnischen Barrieren.

Ausgangspunkt für die Eignung einer Gebirgsformation als geologische Barriere ist die Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix, die sogenannte Matrixpermeabilität eines Gesteins. Mit der primär vorhandenen Matrixpermeabilität unter Gebirgsdruck (primäre Gebirgsspannungen) steht und fällt die prinzipielle Eignung eines Gesteins als Barrieregestein. Allein die Matrixpermeabilität ist jedoch nicht ausreichend zur Charakterisierung der Permeabilität einer Gebirgsformation, da sie überlagert werden kann von einer durch ein Trennflächengefüge bewirkten Kluftpermeabilität, die auf geogen und technogen induzierten Kluft- bzw. Rissbildungen¹ beruht. Daher sind die Gesteine auch auf ihre mechanischen und insbesondere bruchmechanischen Eigenschaften hin zu untersuchen. Eine Gesteinsfazies, die aufgrund der Ausbildung ihrer Matrix sowie der mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften eine hinreichend geringe Matrixpermeabilität aufweist und damit als geeignet erscheint, muss somit nicht zwangsläufig im Gebirgsverband dieselben positiven Merkmale besitzen. Hier können fossile geogene oder zukünftige anthropogene/geogene Einwirkungen zur Ausbildung von Mikro- und Makrofissuren geführt haben bzw. führen, die die Permeabilität signifikant heraufsetzen. Aus diesem Grund sind geologische Vorgeschichte und zukünftig zu erwartende Beanspruchungen im Vergleich zur rissbildungsfreien Beanspruchbarkeit weitere Randbedingungen, die signifikanten Einfluss auf vorhandene bzw. zu erwartende Wegsamkeiten nehmen. In engem Kontakt mit der Anforderung *geringe Grundwasserbewegung*, die eher auf die derzeitige und konstant in die Zukunft fortgeschriebene hydromechanische Situation einer Gebirgsformation fokussiert ist, soll mit der Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* der Blick mehr auf das zukünftige Verhalten einer Gebirgsformation gelenkt werden, um ausgehend von den geomechanischen Verhältnissen die Wahrscheinlichkeit und Intensität einer Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten zu bewerten.

¹ Klüfte = geogen entstandene Trennflächen (geschlossen, offen, gefüllt, verheilt); Risse = infolge technogener Einwirkungen entstandene Trennflächen



Die Ausbildung von zusätzlichen Wegsamkeiten in Festgesteinen kann auf der Neubildung von Rissen, auf der Erweiterung bereits vorhandener Risse oder/und auf der Aufweitung bereits bestehender Risse beruhen und ist damit grundsätzlich mit einer Gefügauflockerung (Dilatanz) und einer Gefügeentfestigung verbunden, so dass dilatante Beanspruchungen auch Spannungsumlagerungen und zusätzliche Deformationen zur Folge haben. In feinklastischen Locker- und Festgesteinen mit adsorptiv an die Mineralkornoberflächen gebundenen Hydrathüllen können allerdings neben rissbezogenen Wegsamkeiten zusätzlich auch (weitere) Wegsamkeiten durch eine z.B. hydraulisch und/oder thermisch bedingte Mobilisierung des durch geochemische Bindungskräfte gebundenen Haftwassers ohne Änderungen des mineralischen Gefüges entstehen.

Wegen der hier insgesamt größeren Bedeutung der Festgesteine soll vereinfachend nachfolgend das Kriterium *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* zur Verkürzung der Formulierung ohne Einschränkung der Betrachtungsbreite und in damit synonyme Bedeutung umbenannt werden in *geringe Neigung zur Rissbildung*.

Betrachtungsebenen

Den vorstehenden Überlegungen folgend ist zunächst eine Bewertung darüber vorzunehmen, ob eine Gebirgsformation die Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* bzw. *geringe Neigung zur Rissbildung* per se nicht erfüllt und aus dieser Sicht schon grundsätzlich als ungeeignet erscheint oder ob sie erwarten lässt, diese Anforderung erfüllen zu können.

Über diese Bewertung von bloßen Gesteinseigenschaften hinaus ist dann auch die zukünftig zu erwartende Beanspruchung, die auf das Gebirge einwirken wird, zu betrachten und in Relation zu setzen zu der rissfreien Beanspruchbarkeit.

Da die Anforderung nicht unmittelbar in eine die verschiedenen Aspekte abdeckende Bewertungsskala nach Maß und Zahl umzusetzen ist, werden zunächst Indikatoren gesucht, die jeweils einzelne Eigenschaften der Anforderung erfassen. Diese Eigenschaften werden dann in Kriterien gefasst und nachfolgend soweit möglich mit Grenz- und Schwellenwerten versehen,



so dass letztendlich die Anforderung durch einen skalierten Bewertungskatalog operationalisiert wird.

Vorgesehen ist nachstehend auf diesen Ansatz aufbauend die Entwicklung einer Vorgehensweise, bei der als Ergebnis die Bewertung einer Gebirgsformation gefunden werden soll durch die Abarbeitung eines an die Erfüllung/ Nichterfüllung von indikatorenbezogenen Kriterien gebundenen sukzessiven Ausschluss- oder Abwägungsprozesses. Erscheint dabei die Anforderung bei einer Gebirgsformation nach den in bestimmter Weise geordneten und sukzessive zu bearbeitenden Kriterien und den darauf bezogenen Bewertungsmaßstäben nicht mehr erfüllbar, so werden weitere Untersuchungen für wenig sinnvoll erachtet. Die Anforderung in hinreichendem Maße zu erfüllen versprechende Gebirgsformationen dagegen müssen allerdings zur expliziten Bestätigung der Indikatorerfüllung in weiteren Verfahrensschritten standortbezogen noch näher untersucht und charakterisiert werden.

Angesichts der unterschiedlichen Befundlagen in den verschiedenen Stufen des Standortauswahlverfahrens nach Bild 1.1 werden die Indikatoren durch zugeordnete Kriterien, die jeweils wichtige Eigenschaften des Indikators und damit der Anforderung charakterisieren, repräsentiert, denen dann qualitativ sowie möglichst auch quantitativ ausgestaltete Bewertungsmaßstäbe zuzuweisen sind, die letztlich in einer ordinalen Bewertungsskala münden. Auf dieser Grundlage soll eine nachvollziehbare gestufte Bewertung dahingehend erfolgen, ob eine Gebirgsformation die Anforderung nach einer nur geringen Neigung zur Rissbildung (Ausbildung von Wegsamkeiten) *grundsätzlich erfüllt*, *weitgehend erfüllt* oder *eher nicht erfüllt*. Aus den unterschiedlichen Kenntnisständen in den verschiedenen Verfahrensschritten ergibt sich eine auf bis zu zwei Ebenen mit unterschiedlichen Betrachtungstiefen orientierte Bearbeitung des zugeordneten Kriterienkatalogs entsprechend Schritt 2, Schritt 4 und Schritt 5 nach Bild 1.1. Methodisch gesehen sind dabei Schritt 2 sowie die Schritte 4 und 5 im Grundsatz gleichartig, wenngleich die Datenlage sehr unterschiedlich ist:

- Schritt 2: Auswahl von Teilgebieten nach einem Abwägungsprozess auf der Grundlage von *Schreibtitelkenntnissen* z.B. zu Gebirgsaufbau und Materialeigenschaften



- Schritt 4 und 5: Festlegung der Standorte für die untertägige Erkundung bzw. Standortentscheidung jeweils auf der Grundlage von *gegenständlichen Standortuntersuchungen*, z.B. Standorterkundung übertage bzw. untertage und laborative Untersuchungen zu Materialeigenschaften bzw. orientierende Berechnungen zu Tragverhalten/Gebirgsbeanspruchung.

Ein Endlager kann nach der grundsätzlichen Vorgabe des AkEnd nur dann als langzeitsicher betrachtet werden, wenn an dem ausgewählten Standort insbesondere aufgrund der Eigenschaften der geologischen Barriere(n) die abgelagerten Abfälle mit ihren umweltgefährdenden Schadstoffen über Zeiträume bis in die Größenordnung von einer Million Jahre aus der Biosphäre ferngehalten werden. Bei einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist für die Remigration von aus den Abfällen mobilisierten Schadstoffen in die Biosphäre der Transportweg über fluide Phasen durch das zunächst im Grundsatz als impermeabel bis höchstens gering permeabel vorausgesetzte Gebirge der zentrale Transportweg. Reale (nachgewiesene) oder potentielle (der Erfahrung nach nicht ausschließbare), in beiden Fällen aber tektonisch bedingte Schwachstellen im Gebirgsbau sind dabei besonders zu berücksichtigen. Demzufolge steht und fällt die Eignung einer Gebirgsformation als geologische Barriere in grundsätzlicher und gradueller Hinsicht mit den bereits primär geogen vorhandenen Wegsamkeiten sowie mit der Beantwortung der Frage, ob sich nachhaltig nachteilige sekundäre Wegsamkeiten unter den zu erwartenden Einwirkungen aus Auffahrung und Betrieb des Endlagers und aus geologischen Prozessen ausbilden können und in einer erweiterten Betrachtungsweise auch, ob und unter welchen Randbedingungen eine hydraulisch wirksame Rückbildung dieser sekundären Fissuren erfolgen könnte (Risschließung, Rissverheilung).

Dabei ist von zwei generellen Randbedingungen auszugehen:

- Gebiete mit rezenter Tektonik (z.B. aktive Störungszonen, Hebungszone, Erdbebenzone, vulkanische Zonen) werden ausgeschlossen, d.h. zukünftig im Zeitraum von etwa 1 Million Jahren sollten unmittelbar am Standort keine signifikanten zusätzlichen tektonischen Beanspruchungen zu besorgen sein. Halokinetische Prozesse sind dabei gesondert zu betrachten, wobei im viskoplastischen Salzgebirge andere und günstigere geomechanische Bedingungen vorliegen als z.B. in elastisch-spröden bis gering plastischen Gesteinen, die in das dominierende Steinsalzgebirge schichtenartig eingelagert sind, denen diese Be-



wegungen dann aufgezwungen werden und die ihnen nicht oder bruchfrei nur begrenzt folgen können (z.B. Anhydritbänke und -schollen, Salztone).

- Es erfolgt (konservativ) keine Kreditnahme von zukünftigen Sekundärmineralisationen, da rezent gering permeable Gebirgsformationen ausgewählt werden und von gleichbleibenden geochemischen Verhältnissen in der Zukunft ausgegangen wird.

Zur differenzierenden Konkretisierung der Anforderung im Hinblick auf die Ableitung von Indikatoren/ Kriterien soll einerseits zunächst die (Betrachtungs-) **Ebene der Gesteine** mit dem Korngefüge (im Maßstab Handstück) diskutiert werden, andererseits muss anschließend auch die (Betrachtungs-) **Ebene des Gebirges** mit dem Trennflächengefüge (im Sinne des großräumigen Gefüges mit dem Größenmaßstab Tragwerk, Barriere, Gebirgsformation) analysiert werden, weil die hydraulischen Eigenschaften des handstückgroßen Gesteins nicht unmittelbar auf den großräumigen Gesteinsverband (= Gebirge) übertragen werden können ohne Einbeziehung der nachteiligen hydraulischen Wirkungen eines etwaigen Trennflächengefüges.

Dabei wird von dem Ansatz ausgegangen, dass Gesteine, die im Größenbereich des *Gesteins* (Handstücks) unter in situ Bedingungen nicht bereits die notwendige hinreichend geringe Permeabilität aufweisen, auch im Größenbereich Gebirgsformation dieser Anforderung nicht genügen werden. Andererseits können Gesteine mit im Größenbereich Handstück hinreichend geringer Permeabilität dann jedoch im Größenbereich Gebirgsformation unzulässig große Permeabilitäten aufweisen, wenn ein entsprechend wegsames Trennflächengefüge vorliegt. Gesteine im Größenbereich Handstück mit bekannter Mineralzusammensetzung/ Korngefüge geben aufgrund vorliegender Erfahrungen bereits einen ersten Aufschluss über die wichtigsten mechanischen und hydraulischen (= hydromechanischen) Eigenschaften. Ihre Mineralzusammensetzung und der Korngefügeaufbau sind die Ausgangspunkte für die Gefügeeigenschaften und damit für die Ausbildung der geohydraulischen Eigenschaften sowie für die bruchmechanischen Eigenschaften.

Wenn Mineralkornzusammensetzung und Korngefügeaufbau eines Gesteins die entscheidende Grundlage für seine hydraulischen und mechanischen Eigenschaften sind, dann lassen sich daraus auch grundlegende mechanische Phänomene von Gesteinen wie Sprödigkeit oder Duk-



tilität bzw. Elastizität, Plastizität und Viskosität (Kriechen) sowie auch Porosität und Permeabilität zumindest in der Tendenz identifizieren. Für das bruchmechanische Verhalten sind weiter dann noch die Gesteinseigenschaften von zentraler Bedeutung, die Rissbildung, Rissausbreitung, Risschließung und Rissverheilung bedingen. Zumindest qualitativ, in Tendenzen auch quantitativ, wird eine Einschätzung/ Zuordnung derartiger Eigenschaften zu einem Gestein möglich über die Gesteinsbezeichnung. Dabei werden bestehende Erfahrungen genutzt und generalisiert auf die Gesteinsfazies übertragen.

Im Größenbereich des *Gebirges* steht die Ausbildung der Gesteine im großräumigen Maßstab im Blickpunkt. Neben der großräumigen Homogenität und damit der räumlichen Konstanz der als positiv bewerteten Gesteinseigenschaften ist dabei das geotektonisch überprägte Trennflächengefüge von zentraler Bedeutung. Dabei ist davon auszugehen, dass jede Trennfläche zunächst als geomechanische und geohydraulische Schwächezone anzusehen ist, durch die die für das Gestein abgeleiteten mechanischen und hydraulischen Eigenschaften verschlechtert werden. Da für die Bewertung der Untergrundverhältnisse im Hinblick auf ihre Eignung als Endlagerstandort aufgrund der Tragwerksabmessungen in Verbindung mit der räumlichen Ausdehnung der induzierten thermomechanischen Überzugswirkungen die Ebene des Gesteins (Handstück) nachhaltig verlassen wird, muss in den jeweiligen Betrachtungsgebieten auch auf der Ebene des Gebirges formations- und eigenschaftsbezogen eine Homogenbereichseinteilung vorgenommen werden. Als Grundlage dafür muss untersucht werden, inwieweit stratigraphische Einteilungen mit ihrer petrographischen Gliederung und den zugeordneten Eigenschaften aufgrund der Wirkungen des Trennflächengefüges in diesen Eigenschaften zu modifizieren und gegebenenfalls noch weiter zu differenzieren sind. Bei einer Gebirgsformation handelt es sich nicht wie bei Tragwerken des übertägigen Ingenieurbaus um ein Tragelement aus einem künstlichen Baustoff, der in der erforderlichen Qualität in einem überwachten technologischen Prozess hergestellt werden kann, sondern um Jahrtausende alte Gesteinsablagerungen, die bereits bei der Entstehung und dann im Lauf der Zeit vielfältigen geogenen Veränderungen der Milieubedingungen (Temperatur, Lösungen) und der Beanspruchungen (Gebirgsdruck, Temperaturänderungen) ausgesetzt gewesen sein können. Wie unter anderem das Herstellungsverfahren und die Vorbeanspruchungen eines Baustoffs seine späteren Eigenschaften mitbestimmen, haben dementsprechend auch die Entstehungsprozesse einer



Gebirgsformation und die daraus resultierenden Einwirkungen geomechanischer, geothermischer, geohydraulischer und geochemischer Natur mitunter nachhaltigen Einfluss auf ihre Eigenschaften. Aus diesem Grund sind neben der Genese der relevanten Gesteinsarten auch zu betrachten zukünftige tektonische Prozesse, um hieraus Tendenzen zu Rissbildungen einzuschätzen. Dabei ist sicherlich mit Blick in die geogene Zukunft ein Merkmal für die Einschätzung das rissbildungsbezogene Verhalten des Gesteins in der geogenen Vergangenheit.

Aber nicht nur die geogenen (primären) Einwirkungen haben Einfluss auf die Eigenschaften einer geologischen Formation, sondern auch die technogenen (sekundären) Beanspruchungen, d.h. die Einwirkungen aus Auffahrung, Betrieb, Stilllegung, Nachbetrieb und ggf. betrieblichen Störfällen müssen in ihren Auswirkungen auf Porosität/ Permeabilität der barrierenrelevanten Homogenbereiche berücksichtigt werden, weil das Wirts- bzw. Barrierengestein eines Endlagers gerade auch diesen Einwirkungen in hinreichendem Maße ohne nachhaltige Permeabilitätszunahme widerstehen muss. In diesem Zusammenhang ist explizit auf den Lastfall Gasbildung hinzuweisen, der langfristig zu keiner Schwächung der Barrierenintegrität führen darf. Hier wäre ein Gestein vorteilhaft, das z.B.

- aufgrund der vorhandenen effektiven Porosität/ Permeabilität in hinreichendem Maße gaswegsam ist, so dass sich unter Gasdruckwirkung keine Risse ausbilden, und das gleichzeitig durch seine Anordnung im großräumigen Gebirge keinem unzulässigen Grundwasserzutritt unterliegt,

oder das

- zwar als geologisch dicht anzusehen ist, sich aber unter dem langsam ansteigenden Gasdruck wie eine semipermeable Membran verhält und einerseits durch gasdruckbedingte Sekundärfissuren für das Gas vorübergehend wegsam wird, andererseits jedoch gegen ein Eindringen des außerhalb des Barrierengesteins anstehenden Grundwassers infolge des wirkenden Gebirgsdrucks und seiner Verheilungsfähigkeit seine Impermeabilität nach dem Gasdurchgang vor dem Eindringen wässriger Lösungen rekonstituiert.

Damit ist im Größenbereich *Gebirge* zu prüfen, ob die positiven Eigenschaften aus dem Größenbereich *Handstück* ohne Modifikation übertragen werden können bzw. welche Modifika-



tionen vorzunehmen sind und darüber hinaus, ob diese Eigenschaften unter den zu erwartenden zukünftigen Einwirkungen auf das Gebirge als Tragwerk erhalten bleiben bzw. rekonstruiert werden (können).

1.2 Hypothesen zu rissbildungsrelevanten Eigenschaften von Gesteinen

Hypothesen zu Identifizierungsparametern

Mit aus den Gesteinsbezeichnungen erfahrungsgemäß abgeleiteten Einschätzungen über das jeweilige Gesteinsgefüge (Struktur und Textur), den geohydraulischen und geomechanischen, insbesondere auch bruchmechanischen Eigenschaften, den geotektonischen Verhältnissen sowie den geogenen und den technogenen Einwirkungen wird versucht, geologische Formationen zu identifizieren, die eine geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweisen und bei denen eine Tendenz zur Verheilung von Wegsamkeiten besteht. Dabei ist unter Bezug auf den methodischen Ansatz des Auswahlverfahrens davon auszugehen, dass in den unterschiedlichen Verfahrensschritten in unterschiedlicher Qualität und Belegdichte dokumentierte Daten zu den entscheidungsrelevanten Parametern vorliegen. Die Bandbreite reicht hier von *Schreibtischkenntnissen* (= erfahrungsmäßige Einschätzung) bis zu standortbezogen in Laborversuchen ermittelten und geostatistisch bewerteten/ abgesicherten Vorortbefunden.

Grundsätzlich gilt zunächst der folgende Ansatz:

Die Gewährleistung langfristig geringer Migrationsraten in einem Barrierensystem erfordert auch unter zukünftigen technogenen und geogenen Beanspruchungen/ Einwirkungen die Gewährleistung einer geringen Grundwassergeschwindigkeit und damit zunächst eines geringen hydraulischen Gefälles. Mit Blick auf die Belegbarkeit dieser Eigenschaft angesichts der extremen Prognosezeiträume bei der relativ gesehen größeren Sensibilität geohydraulischer Systeme gegenüber Veränderungen erscheint allerdings die Einschätzung der Gewährleistung des Erhalts einer geringen Gebirgsporosität/ Gebirgspermeabilität auf Grundlage des weniger sensiblen geomechanischen Systems zuverlässiger möglich. Damit folgt: Bei rezent vorhandener geringer Porosität/ Permeabilität auf Gebirgsebene ist es notwendig, auch für die



Zukunft den Erhalt dieser Eigenschaft prognostizieren zu können. Diese Prognose erscheint insbesondere dann plausibel, wenn der Formation bereits erfahrungsbelegt eine geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten (= geringe Neigung zur Rissbildung) unter der Einwirkung zukünftiger geogener und technogener Lasten zugewiesen werden kann.

Eine zentrale Voraussetzung für die Eignung einer Gebirgsformation als geologische Barriere ist damit die Impermeabilität bzw. hinreichend geringe Permeabilität des Gesteinsgefüges, d.h. anstehende Gesteine mit geringer Matrixpermeabilität sind die Grundlage und der Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen. Aber auch in derzeit derart gefügedichten Gesteinen können unter äußeren Einwirkungen sekundäre Rissysteme entstehen, und zwar umso intensiver dann, wenn unter der Einwirkung geogener oder technogener Beanspruchungen (mechanisch, thermisch, hydraulisch)

- (1) die eher elastisch-spröden Gesteine nicht hinreichend tragfähig sind, die aufgeprägten Beanspruchungen ohne Überschreitung der Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit aufzunehmen oder
- (2) die Gesteine kein hinreichendes Spannungsrelaxationsvermögen aufweisen oder
- (3) die Gesteine mit plastisch-viskosem Verhalten sich zur Spannungsumlagerung nicht in hinreichendem Maße bruchlos plastisch-viskos verformen können oder
- (4) die Gesteine mit ausgeprägt viskosem Verhalten deformationsbedingt Gefügauflockerungen und Gefügeentfestigungen erfahren

und somit in allen diesen Fällen mit der Ausbildung von Mikro- oder Makrorissen auf die einwirkenden äußeren Lasten reagieren. Dabei ist in die weiterführenden Überlegungen einzubeziehen, dass die elastisch-spröden Gesteine eher relativ hohe Gesteinfestigkeiten aufweisen, während die viskoplastisch-duktilen Gesteine dagegen eher im Bereich der niedrigeren Gesteinsfestigkeiten zu finden sind.

Das rupturale Verhalten nach (1) bzw. (2) wird als spröde bezeichnet, während Fissurbildungen nach (3) und (4) unter vergleichsweise großen Verformungen den duktilen Brüchen zugeordnet werden. Die Fähigkeit zu inelastischer Deformation und damit ein duktiler Material-



verhalten sind allerdings die Grundlage für weitgehend deformationsgetragene Umlagerungen von Beanspruchungen im Gebirge ohne Aufbau extremer Spitzenwerte, so dass bei Gesteinen mit entsprechend weitgehend rissfreier und damit dilatanzfreier Deformationsfähigkeit beanspruchungsinduzierte Rissbildungen a priori zumindest vermindert werden.

Dieser tendenzielle Befund legt die Formulierung einer ersten Hypothese nahe:

Hypothese (1): Gesteine mit ausgeprägter Duktilität weisen im Grundsatz eine nur geringe Neigung zur Rissbildung auf.

Neben den Mechanismen der Rissentstehung und der Rissausbreitung sind auch Mechanismen der Rissverheilung bekannt. Dabei sind zu unterscheiden der Fall der bloßen mechanischen Risschließung durch Kompaktion der Rissflächen und der Fall der eigentlichen Verheilung von Rissen mit der Neubildung eines kohäsiven Verbundes zwischen den ehemaligen Trennflächen z.B. durch entsprechend den geochemischen Milieubedingungen gesteuerte Rekristallisationsvorgänge im Korngefüge.

Bezüglich der Verheilungsfähigkeit ist offensichtlich, dass neben der Fähigkeit eines Gesteins zur Rekristallisation mit der Wiederherstellung des Mineralkornverbundes auch ein hinreichendes inelastisches dilatanzfreies Verformungsvermögen vorhanden sein muss. Weist ein durch Fissuren überprägtes Gestein keine viskoplastischen Eigenschaften auf und deformiert es sich unter den Gebirgseinwirkungen ohne oder mit Veränderung des Tragsystems und damit der äußeren Beanspruchungsbedingungen nicht in hinreichendem Maße, so ist davon auszugehen, dass die entstandenen Risse grundsätzlich langfristig erhalten bleiben. Wenn also Gesteine mit ausgeprägter Duktilität und damit solche, die nicht unter nur geringen Verformungen risshaft versagen, schon eine geringere Neigung zur Rissbildung haben und die Rissverheilung darüber hinaus ebenfalls ein Phänomen ist, welches zumindest zum Teil von den jeweiligen Deformationseigenschaften abhängt, dann liegt die Formulierung einer zweiten Hypothese nahe:

Hypothese (2): Gesteine mit nachgewiesener Verheilungsfähigkeit unter Gebirgseinwirkungen sind tendenziell auch als duktil anzusehen und besitzen unter Bezug auf Hypothese (1)



dementsprechend a priori eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Rissen, deren Dauerhaftigkeit durch die Verheilungsfähigkeit zumindest gemindert wird.

Ergänzend ist im Zusammenhang mit der Verheilungsfähigkeit von Gesteinen auch auf die Quellfähigkeit mancher Tongesteine hinzuweisen. Dieser Mechanismus ist an das Vorhandensein quellfähiger Tonminerale gebunden und wird allerdings erst dann aktiviert, wenn nach der Rissbildung wässrige Lösungen zusickern und den Wassergehalt im Gestein erhöhen. Eine sekundäre Rissinjektion mit Fremdmaterial zur Herabsetzung der Permeabilität und damit Abdichtung des Gebirges wird hier nicht betrachtet.

Beide Hypothesen dürfen nicht den Blick dahingehend verengen, dass nur *duktile Gesteine* mit nachgewiesener Verheilungsfähigkeit die notwendigen Eigenschaften aufweisen könnten, die eine geringe Neigung zur Rissbildung erwarten lassen. Denn es könnte grundsätzlich auch das andere Extrem des grundsätzlichen Materialverhaltens zu aus dieser Sicht geeigneten Gebirgsformationen führen: *spröde Gesteine* mit ausgeprägt hoher Festigkeit und keinen bzw. wenig ausgeprägten Kriecheigenschaften neigen zwar zur Rissbildung, aber nur bei entsprechend großer deviatorischer Beanspruchung. Daher könnte bei entsprechend großer absoluter Festigkeit eines Gesteins die Grenze der rissbehafteten Beanspruchbarkeit so hoch sein, dass sie unter den vorhandenen bzw. zu erwartenden Sekundärbeanspruchungen im Gebirge infolge Endlager/ zukünftiger Tektonik nicht erreicht wird oder wenn doch, dass dann aber die überbeanspruchten Bereiche eine nur geringe räumliche Ausdehnung im Konturbereich der Grubenbaue und damit im Nahfeld erreichen und für den Nachweis der Integrität der geologischen Barriere unbedeutend sind (Ansatz: Endlager wird von räumlich hinreichend ausgedehnten geologischen Barrieren umgeben). Und weiter: durch die wenig ausgeprägten duktilen Eigenschaften muss unterstellt werden, dass sich nach vollständiger Spannungsumlagerung auch infolge lokaler Überbeanspruchung ein stabiles, sich im Laufe der Zeit nicht vergrößerndes Rissystem in den konturnahen Auflockerungsbereichen einstellt. Dieses Verhalten kann als hinreichende Bedingung für die Möglichkeit einer auf technischen Maßnahmen beruhenden und bei geeigneter Werkstoffwahl langfristig wirksamen Verheilung dieser sekundären Rissysteme angesehen werden, woraus sich die anschließende dritte Hypothese ableiten lässt:



Hypothese (3): Ausgeprägt spröde und hochfeste Gesteine neigen grundsätzlich zur Rissbildung. Bei entsprechend geringer bisheriger geogener Beanspruchung, die nicht zu einer Überbeanspruchung geführt hat, und entsprechend ruhiger tektonischer Lagerung, die auch zukünftig keine nachhaltige geogene Beanspruchung erwarten lässt, ist nicht auszuschließen, dass etwaige unvermeidbare technogen bedingte und auf die Konturnähe beschränkte Risse/ Rissysteme z.B. im Bereich von Querschnittsabdichtungen durch geeignete (geo)technische Maßnahmen in dem erforderlichen Maße zu verheilen sind.

Wenn sich geologische Formationen finden lassen, die, obwohl tektonisch vorbeanspruch, dennoch in hinreichendem Maße rissfrei sind, liegen die folgenden als Hypothese (4) und Hypothese (5) formulierten Vermutungen nahe:

Hypothese (4): Tektonisch in unterschiedlicher Weise deviatorisch vorbeanspruchte Gebirgsformationen, die sich dennoch erfahrungsgemäß als gering durchlässig erweisen, neigen auch in nur geringem Maße zur Ausbildung von Wegsamkeiten (entweder keine signifikante Rissbildung oder Rissbildung und Rissverheilung erfolgen im Mikrobereich und integral synchron).

Ein Maß, mit dem die Intensität der Gefügeschädigung eines Gesteins im Grundsatz quantifiziert werden kann, ist die Dilatanz, d.h. die Volumenvergrößerung infolge Belastung. Es kann gezeigt werden, dass die Dilatanz auch vice versa als Schädigungsparameter angesehen werden kann, denn die Volumenvergrößerung ist eine direkte Folge der Rissbildung, ergo: das vergrößerte Volumen eines Gesteinselementes ist auf neugebildete und geöffnete Risse zurückzuführen. Ist eine Gebirgsformation also tektonisch deviatorisch vorbelastet und dennoch gering permeabel, so liegt die Annahme nahe, dass durch die Beanspruchung eben keine signifikant vernetzten Rissysteme entstanden sind bzw. unter gleichartigen Beanspruchungen auch nicht entstehen werden. Mit dieser Überlegung kann eine fünfte Hypothese formuliert werden:

Hypothese (5): Sind tektonisch deviatorisch vorbeanspruchte Formationen gering permeabel und damit frei von vernetzten Rissystemen, liegt die bisherige Beanspruchung in situ unterhalb der Dilatanzgrenze des Gesteins – es sei denn, das Gestein ist als viskoplastisch-duktil mit Verheilungsfähigkeit ausgewiesen.



Diese Hypothese lässt sich auch wie folgt begründen: war die Formation in der geologischen Vergangenheit immer frei von einem insbesondere geohydraulisch wirksamen Trennflächengefüge, so lag die Beanspruchung auch immer unterhalb der Dilatanzgrenze. Sollte die Formation durch die bisherigen geogenen Einwirkungen bereits bruchhaft beansprucht gewesen sein, so konnten sich die Spannungen umlagern und die Trennflächen verheilen, da die Formation rezent trennflächenfrei ist. Das bedeutet aber auch, dass infolge der Spannungsumlagerungen die Beanspruchung rezent unterhalb der Dilatanzgrenze liegen muss.

1.3 Ableitung von Indikatoren und Kriterien

Werden die vorstehenden fünf Hypothesen hinsichtlich der Ableitung von Indikatoren und Kriterien zur Identifizierung von Gebirgsformationen mit der Anforderung (Eigenschaft) *geringe Neigung zur Rissbildung* ausgewertet, so kann festgestellt werden, dass diese Eigenschaft kumulativ durch nachstehende Indikatoren und die ihnen zugeordneten Kriterien repräsentiert wird:

Indikator II: Veränderbarkeit der Gebirgsqualität bei der anthropogenen und zukünftigen geogenen Zusatzbeanspruchung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Bedingung: Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgspermeabilität unter den zu erwartenden anthropogenen und zukünftigen geogenen Zusatzbeanspruchungen des Gebirges gering sein. Die Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten ist generell mit einer Veränderung der Permeabilität des das Endlager umgebenden Gebirgsbereichs gekennzeichnet. Zur Erfassung und Bewertung dieses Indikators werden nachfolgend drei Kriterien vorgeschlagen, die anhand einer im ersten Schritt (Verfahrensschritt 2) mehr qualitativen und in weiteren Schritten (Verfahrensschritt 4/5) auch verstärkt quantitativen Bewertungsskala eine Ermittlung des Erfüllungsgrades erlauben

Kriterium K1 : Gesteinspermeabilität gleich Gebirgspermeabilität auf hinreichend niedrigem Niveau trotz geogen deviatorischer Beanspruchung.



Kriterium K2 : Barrierenwirkung des Gesteins in der Ausbildung als Gebirgsformation bekannt (z.B. erfahrungsgemäß langfristig trockene Grubengebäude bei entsprechender Abbauführung (Anordnung und Einhaltung hinreichend mächtiger hydrogeologischer Schutzschichten) oder rezente Existenz von wasserlöslichen Gesteinen bzw. von leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe führenden Gebirgsformationen (→ über geologische Zeiträume wirksame impermeable und damit abdichtend wirkende Gebirgsformationen im Umgebungsbereich)).

Kriterium K3 : Ausgeprägte plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz unter in situ Bedingungen (p, T).

Indikator I2: Rückbildbarkeit von technogen bedingten Rissen.

Bedingung: Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte aufgrund der Gesteinseigenschaften grundsätzlich die Rückbildbarkeit von anthropogen/geogen bedingten Rissen/Risssystemen gegeben sein. Zu einer umfassenden Beurteilung der Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten gehört in diesem Zusammenhang auch die Bewertung der Rückbildbarkeit von Rissen, da sie Aufschluss über das Materialverhalten und damit auch über das langfristige Verhalten der geologischen Barriere für die Betrachtung endlagerrelevanter Zeiträume gibt. Zur Erfassung und Bewertung dieses Indikators werden nachfolgend zwei Kriterien vorgeschlagen, die anhand einer im ersten Schritt (Verfahrensschritt 2) mehr qualitativen und in weiteren Schritten (Verfahrensschritt 4/5) auch verstärkt quantitativen Bewertungsskala eine Ermittlung des Erfüllungsgrades erlauben

Kriterium K4 : Risschließung und damit tendenziell reversible Sekundärpermeabilität bei Anhebung der isotropen Beanspruchung ($\sigma_i \uparrow$) und Verminderung der deviatorischen Beanspruchung ($\sigma_v \downarrow$).

Kriterium K5 : Verheilungsfähigkeit von Rissen, wobei die Verheilungsfähigkeit von Rissen in einer bestimmten Gesteinsfazies als Kriterium für die Anforderung *geringe Neigung zur Rissbildung* nicht nur für geotektonisch gering beanspruchte Formationen, sondern auch für Gebirgsformationen angesehen werden kann, die



zwar rezent trennflächengefügefrei sind, in ihrer geologischen Vergangenheit aber geotektonisch (über)beansprucht worden sind.

Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass die druck- und temperaturabhängigen (p/T-) Parameter *Rissschließung* und *Rissverheilung* auch auf Bedingungen treffen müssen, die p/T- bezogen derartige Prozesse begünstigten.

1.4 Fazit und erster Vorschlag für die Kriterienimplementierung

Nicht alle möglicherweise die Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* grundsätzlich erfüllenden Gesteine sind in Deutschland in hinreichender räumlicher bzw. volumenbezogener Verbreitung vorhanden bzw. sind in ihrer diesbezüglichen Existenz ausreichend bekannt. Die Kriterienentwicklung soll sich daher wesentlich an gesteinsmechanischen Eigenschaften orientieren und nachfolgend an exemplarischen Vertretern der jeweiligen Gesteinstypen veranschaulicht und vertieft werden.

Einschlägige gesteinsmechanische Eigenschaften weisen in Bezug auf die vorangestellten Hypothesen folgende Gesteinstypen auf:

- (1) polykristalline Gesteine mit ausgeprägt hoher Festigkeit und vergleichsweise geringer Deformationsfähigkeit und damit sprödebruchartigem Versagen → *Granitgesteine*,
- (2) feinklastische Gesteine mit je nach diagenetischer Kompaktion und Verfestigung sowie zugeordnetem Wassergehalt sehr unterschiedlich ausgeprägter Duktilität und Festigkeit. Dabei gilt die Tendenz, dass mit zunehmendem Wassergehalt die Duktilität zunimmt und die Festigkeit abnimmt, so dass die Versagensform wesentlich durch den Kompaktionsgrad, die Dilatanzfestigkeit und den Wassergehalt bestimmt wird → *Tongesteine*;
- (3) polykristalline Gesteine mit ausgeprägter Duktilität bei vergleichsweise moderater Festigkeit und dadurch bedingt duktilem Versagen. In Abhängigkeit der Minimalspannung, der Vergleichsspannung, der Temperatur und der Verzerrungsrate ist auch eine makroskopisch bruch- und dilatanzfreie unbegrenzte Deformation möglich (→ plastisch-viskose Materialumformung ohne Gefügeschädigung) → *chloridische Salzgesteine*.



Vor diesem generellen Differenzierungshintergrund soll sich die Auswahl der Beispiele für elastisch-spröde polykristalline Festgesteine nach (1) vornehmlich auf Granit beziehen, während die feinklastischen Gesteine nach (2) durch die Tonmergelsteine/Tonsteine und Tone näher charakterisiert werden. Als dritte typische Gesteinsart der polykristallinen Festgesteine mit dem plastisch-viskosem Verhalten nach (3) wird Steinsalz (Halit) als Vertreter gewählt.

Eine erste qualitative Einschätzung zu dieser Anforderung ergibt folgenden Sachstand:

(1) Neigung zur Rissbildung

Wesentliche Parameter zur Identifizierung der hier relevanten Gesteinseigenschaften sind damit die Spröbruchneigung der Gesteine einerseits sowie die Duktilität der Gesteine andererseits. Im Grundsatz kann davon ausgegangen werden, dass Gesteine mit einem elastisch-spröden Materialverhalten bei entsprechender Beanspruchung eher zu Rissbildungen neigen als Gesteine mit (visko-) plastisch-duktilen Materialeigenschaften, die auf (thermo-) mechanische Beanspruchung mit verstärkten Deformationen und Spannungsrelaxation reagieren. Gerade diese Gesteine sind es dann auch, die bei entsprechendem Mineralbestand und günstigen Umgebungsbedingungen (p, T, Lösungen) Rissbildungen rückbilden können. Dieses reversible Rissbildungsverhalten ist erkennbar an einer beanspruchungsabhängig reversiblen Sekundärpermeabilität. Eine erste grobe Zuordnung könnte etwa wie folgt aussehen:

Granitgestein

Tonmergelstein

Salzgestein



eher geringere Neigung zur Rissbildung

und größere Neigung zur Rissverheilung

Allerdings ist bei Voraussetzung hinreichend geringer Primärpermeabilität das zu erwartende Beanspruchungsniveau von ebenso wesentlicher Bedeutung, da Beanspruchungen unterhalb der (p/T- abhängigen) Dilatanzgrenze des jeweiligen Gesteins noch nicht einmal Sekundär-rissbildung erwarten lassen.



(2) Empfehlung zur Implementierung der Anforderung in das Verfahren mit ihrem Kriterienkatalog

Bezüglich der Implementierung dieser Anforderung in das Standortauswahlverfahren nach Bild 1.1 ist aus derzeitiger Sicht zu empfehlen:

- (1) Die Anforderung *geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten* sollte dem Abwägungsprozess zugeordnet werden.

Diese Anforderung kann sowohl

- (2) in den Indikator-/ Kriterienkatalog zur Identifizierung von Teilgebieten mit günstiger geologischer Gesamtsituation und ihrer prioritären Reihung in Schritt 2 mit entsprechend dem verfahrensbedingt nur auf geologischen Karten und erfahrungsgemäßen Übertragungen beruhenden Kenntnisstand

wie auch

- (3) in den Indikator-/ Kriterienkatalog zur Charakterisierung von Standorten und ihrer prioritären Reihung in die Schritte 4 und 5 mit entsprechend dem verfahrensbedingt dann durch standortbezogene (Übertage)Erkundungen bzw. Untertageerkundungen auf vertieftem Niveau vorliegenden Kenntnisstand

mit jeweils ordinaler Skalierung in das Standortauswahlverfahren implementiert werden.

Die nähere Ausformung der ordinalen Skalierung der einzelnen Kriterien und die Gewichtung dieser Anforderung innerhalb des Anforderungskatalogs zur Aggregation der verschiedenartigen Anforderungen ist vom AkEnd in der Phase 1 des Verfahrens vorzuschlagen und definitiv in der nachfolgenden Phase 2 des Verfahrens festzulegen. Da eine technische Kompensation der mit dieser Anforderung verbundenen und als nicht oder nicht hinreichend gegeben bewerteten Gebirgseigenschaften/ Gebirgsreaktionen nur sehr bedingt bis nicht möglich ist und sich die mit dieser Anforderung verbundenen Gebirgs-/ Gesteinseigenschaften in signifikantem Maße auf die Langzeitsicherheit auswirken, sollte der Anforderung ein entsprechend gewichtiger Platz in der Anforderungshierarchie zugewiesen werden.



Die nachfolgend vorgenommene weitere Bearbeitung der Indikatoren/Kriterien in Abschnitt 2 und die Ableitung qualitativ oder quantitativ gestalteter Bewertungsskalen in Abschnitt 3 zeigt, dass die Indikatoren/Kriterien und die jeweils zugeordneten Bewertungsmaßstäbe komplexe und teilweise miteinander auch verwobene Sachverhalte beschreiben, die nicht in jedem einzelnen Sachverhalt jeweils für sich vollständig positiv erfüllt sein müssen, teilweise sogar auch gegenseitig kompensierbar sind. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass bezogen auf den Verfahrensablauf mit zunehmendem Verfahrensfortschritt auch zunehmend verlässlichere und umfangreichere Erkenntnisse zu Gebirgsaufbau und Gebirgseigenschaften vorliegen. Eine auf die Datenlage bezogen markante Zäsur liegt zwischen den Schritten 2 und 4: bis zum Schritt 2 liegen im Grundsatz lediglich Schreibtischkenntnisse vor (bestehende Datendokumentationen und Kartenwerke, Fachliteratur), während ab Schritt 4 standortspezifisch die Daten aus Übertagebohrungen/Untertagebohrungen und von laborativen Untersuchungen an Bohrkernmaterial zur Verfügung stehen.

Die Gewichtung der Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* innerhalb des aus insgesamt 9 Einzelanforderungen bestehenden Anforderungskataloges des Auswahlverfahrens erfolgt außerhalb dieser Ausarbeitung durch den AkEnd.



2 Kriterienbezogene Sachverhalte

Zunächst werden kriterienbezogen geowissenschaftliche, geotechnische und bergbautechnische Sachverhalte in grundsätzlicher Form vorgestellt. Anschließend erfolgt eine spezialisierte Betrachtung auf als relevant erachtete Barrierengesteinsgruppen, namentlich polykristalline nichtkriechfähige Gesteine mit dem Vertreter Granitgestein, feinklastische elastoviskoplastische Gesteine mit dem Vertreter Tongestein und polykristalline elastoviskose, d.h. kriechfähige Gesteine mit dem Vertreter Salzgestein, speziell Steinsalz.

2.1 Kriterium K1: Gebirgspermeabilität gleich Gesteinspermeabilität

Es ist bekannt, dass sich die Eigenschaften eines Gesteins je nach dem betrachteten bzw. untersuchten Größenbereich voneinander unterscheiden können. Relevant sind hier vor allem die Größenbereiche *Handstück* und *Gebirgsformation*, da einerseits laborative Untersuchungen an bis zu handstückgroßen Prüfkörpern durchgeführt werden und andererseits bei der Übertragung der aus den laborativen Untersuchungen erhaltenen Befunde auf das großräumige Gebirge im Meter-, Dekameter- oder auch Hektometerbereich (je nach Einwirkungsbereich der z.B. technischen Anlage) zu beachten ist, dass sich durch ein geotektonisch oder auch technogen bedingtes Trennflächengefüge, dessen Gefügeelemente wie z.B. offene oder geschlossene Klüfte sich nicht repräsentativ in den handstückgroßen Gesteinsprüfkörpern wiederfinden, die Gebirgs- und Gesteinseigenschaften signifikant voneinander unterscheiden können, z.B. durch das Trennflächengefüge reduzierte Gebirgsfestigkeit gegenüber der Gesteinsfestigkeit. Diese Unterschiede betreffen allerdings nicht nur die geomechanischen, sondern auch die geohydraulischen Eigenschaften. So ist aufgrund der vorwiegend rupturrell überprägten Gebirgsausbildung im Grundsatz eine größere Gebirgspermeabilität zu erwarten als sie sich nach den laborativen Befunden an Gesteinsprüfkörpern darstellt. Für relativ gering permeable Formationen mit Permeabilitäten im Bereich von $K = 10^{-17} \text{ m}^2$ und kleiner wird hier von einem tolerierbaren Unterschied im Bereich von bis zu einer Größenordnung ausgegangen (bezogen auf die jeweilig als repräsentativ anzusehende Permeabilität).

Es liegt daher nahe, den Sonderfall einer unverritzten Gebirgsformation, bei der Gebirgs- und Gesteinspermeabilität etwa gleich sind, als ersten Indikator dafür anzusehen, dass die die



betreffende Gebirgsformation aufbauende Gesteinsfazies eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Trennflächen und damit von Fluidwegsamkeiten zumindest unter geogener Beanspruchung aufweist. Diese Einschätzung gilt um so mehr, wenn das Gebirge im Laufe seiner Entwicklungsgeschichte geotektonischen Beanspruchungen unterworfen gewesen ist und sich heute in gestörter Lagerungsform präsentiert. Als erstes Kriterium könnte damit formuliert werden:

Kriterium K1: Die repräsentative Gebirgspermeabilität sollte gleich der repräsentativen Gesteinspermeabilität sein.

Die Permeabilität stellt ein Maß für die Durchlässigkeit eines porösen Mediums gegenüber fluiden Phasen dar, wobei die Form der Poren und die Struktur des Porenraumes implizit in diesem Parameter enthalten sind. Die Permeabilität ist ein Gesteins- bzw. Gebirgskennwert und ergibt sich als physikalische Größe aus dem *Darcyschen* Strömungsmodell zu:

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot \Delta l}{A \cdot \Delta p} \quad (2.1)$$

mit

K = Permeabilität in m^2 ,

Q = Volumenstrom in m^3/s ,

η = dynamische Viskosität des Fluides in $kN \cdot s/m^2$,

Δl = Fließweglänge in m ,

A = durchsickerte Querschnittsfläche in m^2

Δp = Druckdifferenz entlang Δl in kN/m^2 .

Die Permeabilität ist damit eine geometrische Größe, die den wegsamen Porenraum des porösen Mediums charakterisiert. Zusammen mit der dynamischen Viskosität und Wichte des jeweiligen Fluids kann die Permeabilität in den Fluid bezogenen Durchlässigkeitsbeiwert überführt werden:

$$k_F = \frac{K}{\eta} \cdot \gamma_{Fl} \quad (2.2)$$



mit

k_F = Durchlässigkeitsbeiwert nach *Darcy* in m/s,

η = dynamische Viskosität des Fluides in $\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}^2$,

γ_{FL} = Wichte des Fluides in kN/m^3 ,

K = Permeabilität in m^2 .

Für Wasser als exemplarisches Fluid mit einer Temperatur von $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich zum Beispiel eine dynamische Viskosität von $\eta = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($1\text{Pa} = 10^{-3} \text{ kN}/\text{m}^2$), so dass folgender Zusammenhang zwischen hydraulischer Durchlässigkeit k_f und Permeabilität K besteht:

$$k_F = 10^{-7} \cdot K \quad (2.3)$$

Ursache für die Fluiddurchlässigkeit eines porösen Mediums sind die in diesem Medium vorhandenen und miteinander auch vernetzten Hohlräume, wobei es sich sowohl um Poren Hohlräume wie auch um Klufthohlräume handeln kann. Von dieser die vorhandenen und vernetzten Hohlräume charakterisierenden Gesamtporosität zu unterscheiden ist allerdings die sogenannte effektive Porosität, die den an der Fluidströmung beteiligten Porenraum quantifiziert. Neben nicht an der Fluidströmung beteiligten Hohlräumen wie z.B. Totporen bedingt einen weiteren Unterschied zwischen Gesamtporosität und effektiver Porosität die druck-, temperatur- und medienabhängige Haftwasserporosität, die den Anteil des adsorptiv an die Gesteinsmatrix gebundenen, immobilen Haftwassers und einen weiteren, nicht für einen advektiven Fluidtransport zur Verfügung stehenden Hohlraumanteil beschreibt.

Für (hier nicht relevante) Lockergesteine soll Bild 2.1 einen Eindruck vermitteln von der Relation zwischen totaler und effektiver Porosität bei verschiedenen Lockergesteinsarten. Auffallend ist der große Unterschied zwischen Gesamtporosität und Nutz-Porosität (= effektive Porosität) bei den Tonen (T). Aufgrund der partikelgrößenbedingt extrem großen inneren Oberfläche (bis zu $800 \text{ m}^2/\text{g}$ bei Montmorillonit) sind hier die einer Strömung zugänglichen Hohlräume adsorptiv gebunden durch Wasser (hydratvisiertes Wasser, Hydrathüllen) erheblich reduziert (= Haftwasserporosität). Bei diagenetisch verfestigten Tongesteinen sind die Phänomene gleich, die absoluten Zahlenwerte aufgrund der Kompaktion natürliche andere.

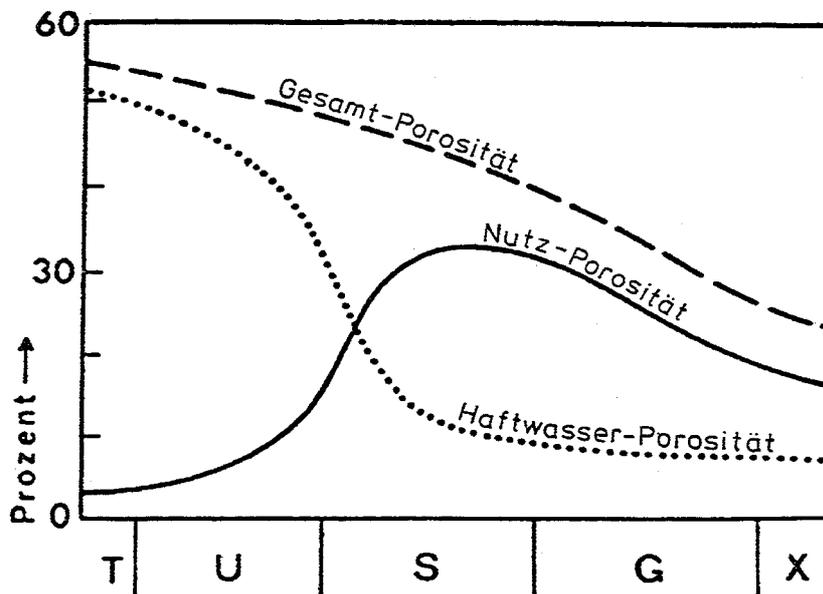


Bild 2.1: Totale und effektive Porosität verschiedener Lockergesteine *nach Richter (1989)*

Es ist leicht einsehbar, dass ein Zusammenhang bestehen muss zwischen der effektiven Porosität und der Permeabilität. Dieser Zusammenhang wird als Porositäts-Permeabilitätsbeziehung bezeichnet, beruht allerdings nicht nur auf der effektiven Porosität, sondern auch auf der wirkenden Beanspruchung und der geometrischen Ausbildung des Porenraumes (z.B. Form, Durchmesser, Tortuosität) und damit auf Struktur/Textur des Gesteins und ist für verschiedene Gesteine in der einschlägigen Literatur dokumentiert, z.B. *Hou (2002), Xie (2002), Stormont (1990, 1992), Souley et al. (2001)*.

Allgemein ergibt sich der Zusammenhang in der Form

$$\Delta K = f(\phi_e, \Delta\phi, \min\sigma, S) \quad (2.4)$$

mit

ϕ_e = effektive Porosität,

$\Delta\phi$ = Porositätsänderung,

$\min\sigma$ = minimale Hauptspannung,

S = Strukturparameter (Gesteinsfazies).



Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass hier nur Gebirgsformationen relevant sind, die kein ausgeprägtes geohydraulisch wirksames Trennflächengefüge aufweisen und auch nur Gesteinsarten näher in Betracht gezogen werden können, die

(1) eine geringe Matrixpermeabilität und damit auch eine nur geringe effektive Matrixporosität aufweisen, im Grenzfall $K \rightarrow 0$ bzw. $\phi_e \rightarrow 0$ bzw.

(2) geochemisch stabil sind.

Damit erscheint die Annahme sinnvoll, dass Porositätsänderungen auf mechanische Beanspruchungen zurückzuführen sind und zwar auf mechanische Beanspruchungen derart, dass sich unter ihrer Wirkung Risse im Gesteinsgefüge ausbilden, die ihren Ursprung in vorhandenen Gefügedefekten haben. Rissbildung und Risswachstum sind damit die entscheidenden Mechanismen und die Ursache für Porositäts- und damit Permeabilitätsänderungen. Phänomenologisch führen die Sekundär-Rissbildungen zu einer Gefügeentfestigung und bei Rissöffnungen weiter zu einer Gefügauflockerung und damit zu einer Porenraumvergrößerung eines Gesteinselementes, die aus mechanischer Sicht als Dilatanz bezeichnet wird.

Damit gelingt es, den geomechanischen Zustand und den geohydraulischen Zustand eines Gesteinselementes mit einander zu verbinden:

$$\text{vorh}\sigma_v > \beta_{Dil} \rightarrow \varepsilon_{vol} > 0 \rightarrow \Delta\phi \rightarrow \Delta K \quad (2.5)$$

mit

$\text{vorh}\sigma_v$ = vorhandene deviatorische Beanspruchung

β_{Dil} = Dilatanzfestigkeit

ε_{vol} = Dilatanz (Volumendehnung)

$\Delta\phi$ = Änderung der effektiven Porosität

ΔK = Änderung der Permeabilität.

Voraussetzung für die quantitative Ausgestaltung der Gl. (2.5) ist die Verfügbarkeit gesteinstypbezogener Modelle zur belastungs- und gegebenenfalls standzeit- bzw. deformationsabhängigen Quantifizierung der jeweiligen Zustandsgrößen.

Über die Änderung der effektiven Porosität eines Gesteins besteht damit ein quantifizierbarer Zusammenhang von der geomechanisch berechenbaren Dilatanz zur Änderung der Permeabi-



lität, die dann über Gl. (2.4) als geohydraulischer Gesteins- bzw. Gebirgsparameter die Wegsamkeit eines porösen Gesteins bzw. einer Gebirgsformation für die Strömung fluider Phasen charakterisiert. Mit Matrixpermeabilität wird dabei ebenfalls in Abgrenzung zur Gebirgspermeabilität die Durchlässigkeit des Gesteinsgefüges, der Gesteinsmatrix, definiert. Als *technisch dicht* werden Materialien bezeichnet, deren Permeabilität höchstens in der Größenordnung von $K = 10^{-17} \text{ m}^2$ liegt, während als *geologisch dicht* Gesteine angesehen werden, die in der Größenordnung eine Permeabilität von nicht größer als $K = 10^{-20} \text{ m}^2$ aufweisen, *Weber (1994)*.

Unter dem Gesichtspunkt, dass auch technogene Beanspruchungen zu einem rupturrell geprägten Gesteins- bzw. Gebirgsverhalten führen können und die diesbezügliche Veränderung im Gesteins- bzw. Gebirgsgefüge über den Parameter Dilatanz messtechnisch und rechnerisch ermittelt werden kann, ergibt sich auch die Möglichkeit, Rissbildungen als Porositätsänderungen aufzufassen und über die Dilatanz für ein repräsentatives Elementarvolumen des Gesteins (REV) integral zu quantifizieren. Je nach Gesteinsfazies bestehen nun grundsätzlich zwei Möglichkeiten der weiteren Verknüpfung von Dilatanz (= Porositätsänderung) und Permeabilitätsänderung:

- (1) Dilatante Deformationen führen ohne Schwellenwert zu einer Permeabilitätsänderung, wobei die Permeabilitätsänderung je nach Größe der Dilatanz bei gleicher Dilatanzänderung unterschiedliche Zahlenwerte aufweisen kann. Als Beispiel wird hier die von *Stormont (1990)* vorgeschlagene Dilatanz-Permeabilitätsbeziehung aufgeführt:

$$K = A_0 \cdot (\sigma_3^x)^\lambda \cdot (\varepsilon_{Vol})^s \quad (2.6)$$

mit

K = Permeabilität, m^2

A_0 = empirische Konstante, $3,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$

$(\sigma_3^x)^\lambda$ = Hauptspannung, dimensionslos, -, λ als Funktion des Manteldrucks

$(\varepsilon_{Vol})^s$ = Volumenverzerrung (Dilatanz), s als Funktion des Manteldrucks



Damit folgt, dass jede Dilatanz zu einer Permeabilitätszunahme führt und somit implizit die Annahme getroffen wird, dass die sich ausbildenden Wegsamkeiten von Anfang an miteinander vernetzt sind. Die Parameter λ und s sind später modifiziert worden, *Storment (1992)*.

- (2) Dilatante Deformationen führen erst nach Überschreitung eines Schwellenwertes zu einer Zunahme der Permeabilität. Ein Beispiel für ein derartiges Dilatanz- bzw. Schädigungs-/ Permeabilitätsmodell ist bei *Souley et al. (2001)* für Granitgestein zu finden:

$$\log\left(\frac{K}{K_0}\right) = C \cdot \left(\frac{a^3}{a_0^3} - 1_{\text{rat}}\right) \quad \text{für} \quad \frac{a}{a_0} > 1_{\text{rat}} \quad (2.7a)$$

$$K = K_0 \quad \text{für} \quad \frac{a}{a_0} \leq 1_{\text{rat}} \quad (2.7b)$$

mit

K = aktuelle Permeabilität in m^2

K_0 = primäre Permeabilität des unverritzten Gebirges in m^2

C = Materialparameter, gesteinstypabhängig in –

$a(K_1)$ = aktuelle mittlere Risslänge nach beanspruchungsabhängigem Risswachstum in mm

a_0 = primäre mittlere Risslänge in Richtung der maximalen Beanspruchung in mm (in der Größenordnung entsprechend der mittleren Korngröße)

1_{rat} = Materialparameter, der ein charakteristisches Risslängenverhältnis a/a_0 beschreibt, bei dem von dem Beginn einer Rissvernetzung ausgegangen werden kann

K_1 = Spannungsintensitätsfaktor für Modus I (Risswachstum infolge von zugspannungsbedingten Rissen)

Als Matrixpermeabilität für das unverritzte Gestein wird für die hier relevanten Gesteinsarten in der Literatur exemplarisch angegeben:

- (1) Granitgesteine nach *Souley et al. (2001)*



Standort: Untertagelabor für Forschungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Kanada

Die Angaben beziehen sich auf zwei verschiedene Granitfazies, die mit *Lac du Bonnet* und *Senones* bezeichnet werden. Das untersuchte Gesteinsmaterial ist aus einer Teufe von $z = 240$ m entnommen worden. Es wird angegeben, dass etwa ab einer Teufe von $z = 220$ m keine regelmäßigen geogenen Trennflächensysteme mehr vorhanden sind, so dass ab dieser Teufe die Matrixpermeabilität dominant für das geohydraulische Verhalten des Gebirges ist.

Die *Primärpermeabilität* von Gestein/Gebirge ist in triaxialen Kompressionsversuchen ermittelt worden und wird angegeben für Beanspruchungen unterhalb der Dilatanzgrenze zu:

- | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| - Granitfazies <i>Lac du Bonnet</i> | $\min\sigma = 10$ MPa | $K_0 = 10^{-21}$ m ² | } aus Teufe $z = 240$ m |
| - Granitfazies <i>Senones</i> | $\min\sigma = 5$ MPa | $K_0 = 10^{-19}$ m ² | |

(2) Tongesteine :

Intaktes Tongestein, z.B. aus Bure (Frankreich) oder aus Mont Terri (Schweiz), nach *Ghoreychi (1997)*, *Boutéca and Sarda (1999)*, *Bock (2001)*: $K_0 = 10^{-20} - 10^{-22}$ m²

Geschädigtes Tongestein (Kontur) nach *Martin & Lanyon (2002)*: $K = 10^{-14} - 10^{-18}$ m²

(3) Salinargesteine:

Intaktes Steinsalz nach *Langer (1995)*: $K_0 \leq 10^{-22}$ m²

Geschädigtes Steinsalz (Kontur) nach *Häfner (2001)*: $K = 10^{-12} - 10^{-17}$ m²

Zusammenfassung mit Blick auf die Bewertungsformulierung:

Es liegt nahe, bei der Bewertung der Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* an erster Stelle einen mit den geohydraulischen Eigenschaften einer Gebirgsformation verbundenes Kriterium heranzuziehen. Da die Durchlässigkeit/Permeabilität sehr eng verknüpft ist einerseits mit gesteinstypischen Eigenschaften (\rightarrow Matrixporosität/ Matrixpermea-



bilität) und andererseits mit der Neigung der Formation zur ruptuellen Reaktion auf geotektonische Beanspruchung (Gebirgsporosität/ Gebirgspermeabilität – Trennflächengefüge), lassen Gebirgsformationen mit einer dem Gestein im Grundsatz gleichen Permeabilität tendenziell auf eine nur geringe Neigung zur Rissbildung schließen, insbesondere bei gestörter Lagerungsform, die als Indiz für erhebliche geotektonische Beanspruchungen gelten kann. Hinzu kommt, dass für hier relevante Gesteinsarten mit geringer Matrixporosität/ Matrixpermeabilität korrespondierende Daten sowohl aus laborativen Untersuchungen an Prüfkörpern (Bohrkernmaterial) wie auch aus Feldmessungen vorliegen. *Appel und Habler (2001)* geben eine aktuelle Zusammenstellung und Auswertung vorliegender Feldmessdaten. Damit liegen sowohl grundsätzliche Gesteinstyp bezogene und Standort bezogene Erkenntnisse vor, wie sich Gesteins- und Gebirgspermeabilität zueinander verhalten können und es kann auch eine Relation zwischen Gebirgspermeabilität und geotektonischer Situation des relevanten Gebirges entwickelt werden. Mit Hilfe des Gesteinstyps als Übertragungsparameter kann damit im Grundsatz eingeschätzt werden, ob eine Gesteinsart mit hinreichend geringer Matrixpermeabilität es erwarten lässt, dass z.B. Teufen und Lagerungsform bezogen auch die Gebirgspermeabilität sich eher in dieser Größenordnung bewegen oder doch in erheblichem Maße davon abweichen wird.

2.2 Kriterium K2: Barrierenwirkung des Gesteins bekannt auch im Größenbereich der Gebirgsformation und bei geogener Vorbeanspruchung

Aus Erfahrung ist bekannt, dass Gebirgsformationen gegenüber Grundwasserbewegungen ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Unterschieden werden aus hydrogeologischer Sicht

- Grundwasserleiter,
- Grundwasserhemmer und
- Grundwassernichtleiter.

Weiterhin ist aus dem bergbaulichen Erfahrungsbereich auch bekannt, dass Grubenbaue in manchen Gebirgsformationen erheblichen Zuflüssen ausgesetzt sind, während in anderen Gebirgsformationen ein trockenes Grubengebäude vorliegt. Im salinaren Bergbau ist es von exi-



stenzieller Bedeutung für den Grubenbetrieb, Zuflüsse aus wasserführenden Hangend-, Liegend- oder Nebengebirgsschichten durch eine entsprechende Abbauführung fernzuhalten.

Gebirgsformationen, die gegenüber Fluidströmungen abdichtend wirken, werden im bergbaulichen Umfeld als *hydrogeologische Schutzschichten* bezeichnet, da sie einen Zutritt von Gebirgswässern aus Grundwasser führenden Schichten in die Grubenbaue verhindern. Im abfalltechnischen Umfeld werden Gebirgsformationen mit dieser Qualität als *geologische Barriere* bezeichnet – von der Vorstellung ausgehend, dass sie aufgrund ihrer sehr geringen bis verschwindenden Durchlässigkeit für die zu verhindernde Schadstofffreisetzung ein zentrales bzw. das zentrale Hindernis darstellen.

Diese Eigenschaft mancher Gebirgsformationen, in einem nur sehr geringen Maße oder auch nicht durchlässig zu sein für Flüssigkeiten und auch Gase wird z.B. genutzt bei der behälterlosen Lagerung von flüssigen oder gasförmigen Medien (Kohlenwasserstoffen) sowie bei der Entsorgung von chemotoxischen Abfällen untertage, sei es durch Verwertung der Abfälle als Versatz in sogenannten Versatzbergwerken oder durch ihre Beseitigung in Untertagedepotien.

Bei diesen den Endlagern für radioaktive Abfälle verwandten geotechnischen Anlagen werden im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises zur Verhinderung von Lösungszutritten bzw. zur Verhinderung einer Freisetzung von kontaminierten Lösungen nach *Hartmann (1997) Barrieren im engeren Sinn* und *Barrieren im weiteren Sinn* unterschieden. Zu den Barrieren im engeren Sinn gehören insbesondere Gebirgsformationen, die erfahrungsgemäß gegenüber Flüssigkeiten und Gasen eine abdichtende Funktion ausüben. Die *Barrieren im engeren Sinn* sind dabei gleichzusetzen mit den Gebirgsformationen, die aufgrund ihrer geringen Permeabilität die Schadstoffausbreitung im Rahmen des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* verhindern bzw. in dem erforderlichen Maße behindern.

Damit sind sowohl aus dem hydrogeologischen und dem bergbaulichen wie auch aus dem abfalltechnischen Umfeld Gebirgsformationen bekannt, die abdichtend wirken und Flüssigkeits- und Gasmigrationen und damit auch den Schadstofftransport (im Wasser gelöste Schadstoffe, schädliche Flüssigkeiten und Gase) im Untergrund barrierenartig verhindern. Damit wird deutlich, dass nicht nur das Gestein im Handstückgrößenbereich, sondern auch entsprechende Gebirgsformationen trotz geogener Einwirkungen abdichtende Funktionen



ausüben und demzufolge nicht durch rupturrell geprägte Prozesse nachteilig überprägt sind. Gründe hierfür können sein, dass entweder die Beanspruchung nicht groß genug war, um Fissuren im Gestein zu induzieren oder entstandene Fissuren inzwischen infolge veränderter Beanspruchungsverhältnisse in Verbindung mit dafür prädisponierten Gesteinseigenschaften wieder verheilt sind. Insbesondere bei nachhaltiger geotektonischer Beanspruchung sind ausgewiesene Barrierengebirgsformationen überzeugender Beleg dafür, dass die entsprechenden Gesteine eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweisen.

Es liegt daher nahe, auf diesen Erfahrungen aufbauend ein Kriterium 2 zu formulieren:

Kriterium K2: Die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener bzw. auch anthropogener Beanspruchung) sollte aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar sein.

Im Hinblick auf die nachfolgende Kriterienentwicklung sind nunmehr Sachverhalte aufzuzeigen, die Hinweise darauf geben, dass in einer bestimmten geotektonischen Situation die eine oder andere an dem Gebirgsaufbau beteiligte Gebirgsformation – charakterisiert durch ihre stratigraphische Bezeichnung und den Gesteinstyp – als abdichtende Schicht gegenüber Wasser- oder Gasbewegungen im geologischen Untergrund wirkt und damit auch kriterienbezogen als geologische Barriere im engeren Sinn betrachtet werden kann.

Als geogene (natürliche) oder auch technogene Hinweise auf die Existenz gering bis nicht durchlässiger Gebirgsformationen können ausgehend von geowissenschaftlichen, bergbaulichen und geotechnischen Erfahrungen folgende geotektonische Situationen angesehen werden (Aufzählung beispielhaft, nicht abschließend):

- Rezente Existenz der Formation als wasserlösliches Gestein;
- Fossile Fluideinschlüsse in der Formation;
- Formation mit Grundwasser führendem Gebirge im Hangenden und unterlagernden wasserlöslichen Gesteinen;
- Formation mit unterlagernden Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe;
- Heranziehung der Formation als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken;



- Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion der Formation auch bei dynamischer Beanspruchung (geogene oder bergbauinduzierte Seismizität);
- Nutzung der Formation zur behälterlosen Lagerung von flüssigen und gasförmigen Medien.

Gebirgsformationen, die in diesen geotektonischen Situationen nachweislich Fluidbewegungen im Untergrund verhindern, sind als potentielle geologische Barrieren im engeren Sinn anzusehen, insbesondere auch dann, wenn diese abdichtende Eigenschaft auch unter geotektonischen Beanspruchungen erhalten geblieben ist (gestörte Lagerungsform).

Im Hinblick auf die Kriteriengestaltung zur Identifizierung entsprechender Gebirgsformationen wäre dann so vorzugehen, dass ein vorgegebener Gebirgsaufbau danach zu bemustern ist, ob an seinem Aufbau auch Gebirgsformationen beteiligt sind, für die erfahrungsgemäß aus bekannten Sachverhalten Barriereneigenschaften belegt sind. Dabei sind es nach den vorstehend aufgeführten Hinweisen sehr verschiedenartige Zustände oder Prozesse, aus denen sich Gebirgsformationen mit Barriereneigenschaften ableiten lassen. Werden diese Zustände oder Prozesse in Kriterien umgesetzt, so muss zur Identifizierung einer Barrierenformation natürlich nicht jedes einzelne Kriterium erfüllt sein. Vielmehr sind die aufgeführten Prozesse und Zustände als alternative Möglichkeiten einer Existenz von Barrierenformationen zu sehen.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass bezogen auf die hier als relevant erachteten Gebirgsformationen bzw. Gesteinstypen eine sehr unterschiedliche Erfahrungsgrundlage vorhanden ist. Grund hierfür ist die Nutzung mancher Gebirgsformationen als Lagerstätte zur Rohstoffgewinnung oder zur Abfallentsorgung, aber auch die Erkundung und Charakterisierung von Lagerstätten im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Endlagerrelevant erscheinen aus deutscher Sicht die Gesteinstypen polykristalline nicht-kriechfähige elastisch-spröde Gesteine (Granitgesteine), feinklastische elastisch-spröde bis (visko)plastisch-duktiler Gesteine (Tongesteine mit geringem Anteil an Tonmineralien bzw. Tongesteine mit hohem Tonmineralanteil) sowie polykristalline elastisch-viskose Gesteine (chloridische Salinargesteine).

Granitformationen sind tendenziell aufgrund ihrer Materialeigenschaften und ihrer Entstehung als magmatische Tiefengesteine infolge Abkühlung des Magmas und nachfolgender



Gebirgsbildungsprozesse durch überprägte und unterschiedlich ausgebildete Störungszonen und Kluftsysteme gekennzeichnet, durch die das Granitgebirge zunächst in blockartige Strukturen zerlegt worden ist und dann innerhalb der Blöcke unterschiedlich intensiv zerklüftet worden ist. Da wenn überhaupt Rissschließung und Rissverheilung ebenfalls nicht in gleichem Maße in allen Bereichen einer Formation stattgefunden haben, muss davon ausgegangen werden, dass innerhalb einzelner großräumiger Blöcke vernetzte Klüfte bzw. Kluftsysteme grundsätzlich vorhanden sind, die Wegsamkeiten für Fluide darstellen. Die Aufgabe besteht damit darin, hinreichend ausgedehnte und Trennflächen freie Formationsbereiche zu finden, die als hinreichend gering durchlässige und in sich abgeschlossene geohydraulische Gebirgsbereiche anzusehen sind (geschlossene hydrogeologische Systeme). Ob die in Abschnitt 2.1 unter Kriterium 1 zitierten kanadischen Verhältnisse auch in Deutschland gefunden werden können, ist aus geowissenschaftlicher Sicht einzuschätzen, aber nach bisherigen Einschätzungen eher nicht zu erwarten. Umfangreiche Erfahrungen aus geotechnischen Anwendungsfeldern liegen in Deutschland nicht vor. International sind Erfahrungen aus Untertagelaboren (z.B. Schweiz, Skandinavien, Kanada) und aus bautechnischen Projekten (Skandinavien) bekannt. Von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffen sind vor einigen Jahren Granitvorkommen in Deutschland identifiziert und charakterisiert worden.

Tongesteine werden genetisch den (fein)klastischen Sedimenten zugeordnet. Die bei zunehmender Überdeckung durch Gebirgsdruck und angehobene Gebirgstemperaturen bewirkte Diagenese führt zu einer Kompaktion und danach zu einer Verfestigung der ursprünglich in breiiger bis weicher Konsistenz mit hohem Wassergehalt abgelagerten Lockergesteine und ihrer Umwandlung auch in Festgesteine (versteintes, im Wasser nicht erweichbares Gefüge).

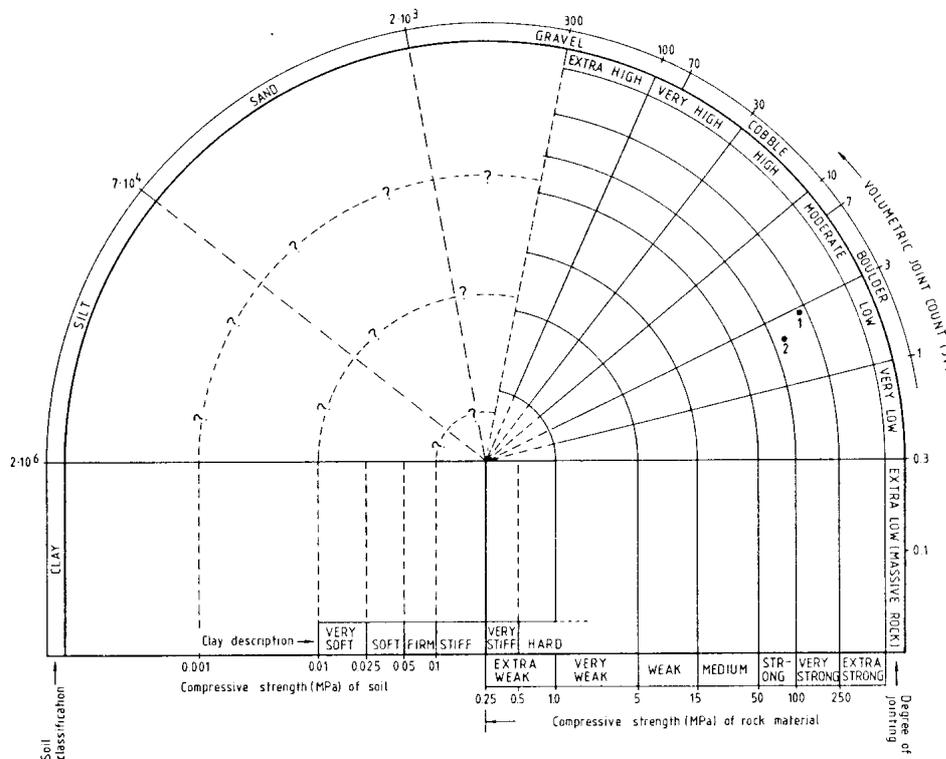


Bild 2.2: Tongesteine im Übergang von Lockergesteinen zu Festgesteinen und festigkeitsbezogene Klassifikation nach *Palmström (1985)*.

Bild 2.2 zeigt eine Zuordnung von Ton und Tongesteinen zu den weiteren Festgesteinen. Je nach geotektonischer Überprägung können die auch in Wechsellagerungen unterschiedlicher Mineralkorngröße abgelagerten feinklastischen Sedimentgesteine in ungestörter oder gestörter Lagerungsform anstehen, wobei die Wahrscheinlichkeit steigt, dass gestörte Lagerungsformen insbesondere bei weniger plastisch-duktilen Tongesteinen von auch geohydraulisch wirksamen Trennflächengefügen überprägt werden. Sedimentgesteine können allerdings auch in gestörter Lagerungsform vorliegen und ein zwar überprägtes, aber hydraulisch nicht wirksames Trennflächengefüge aufweisen. Zusätzlich können durch Rissverschließung und Quellen sowie durch Sekundärmineralisation zunächst offene Klüfte geschlossen bzw. verheilt worden sein.

Aufgrund der Bildungsbedingungen können Tongesteine hinsichtlich ihres Mineralbestandes sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein und verschiedenartigen Prozessen während der Diagenese unterlegen haben, so dass sie einerseits sehr unterschiedliche Materialeigenschaf-



ten von elastisch-spröde bis (visko)plastisch-duktil aufweisen können mit entsprechend unterschiedlicher rupturreller Reaktion auf geotektonische Beanspruchung. Erfahrungen zu den mechanischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften von Tongesteinsformationen liegen in Deutschland in hier relevanten Teufen von mehr als einigen hundert Metern nur vereinzelt vor. Beispiele für direkte Untertageaufschlüsse zum Gebirgsverhalten sind Erfahrungen aus Schachtabteufungen und einzelnen Bergwerken, z.B. Schacht Konrad. Indirekte Aufschlüsse liegen vor aus dem Bereich der Erdöl-/ Erdgaslagerstätten, bei denen die Trägergesteine von abdichtenden Tongesteinsformationen überlagert sind.

Salzgesteine sind chemische Sedimentgesteine, die bei aridem Klima durch Meerwasserverdunstung entstanden sind (Evaporitgesteine). Ihnen zugehörig sind die volumenmäßig dominanten chloridischen Salzgesteine wie z.B. Steinsalz und Kalisalze, die ein ausgeprägtes elastoviskos- duktiles Materialverhalten zeigen, aber auch sulfatische Salzgesteine wie z.B. Anhydrit oder Dolomit, deren Materialverhalten als elastisch-spröde zu charakterisieren ist. Schließlich werden den Salzgesteinen noch zugeordnet die Salztone, Mischgesteine aus Tonen und Salzen, die hinsichtlich ihres Materialverhaltens je nach Salzgehalt und Tonmineralbeschaffenheit zwischen den chloridischen und sulfatischen Salzen einzuordnen sind und der einen oder der anderen Deformationsform zuneigen können.

Aufgrund ihres viskoplastischen Deformationsvermögens neigen die chloridischen Salze bei entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen dazu, sich unter Wirkung geotektonischer Beanspruchungen in als Halokinese bezeichneten Prozessen zu verformen und unterschiedliche Salzstrukturen auszubilden, z.B. Salzanstauungen, Salzsättel oder Salzstöcke. Aufgrund des unter geotektonischen Bedingungen wie anisotropen Gebirgsspannungen, angehobener Temperatur, Fluideinschlüssen und geringer Deformationsrate duktil geprägten Deformationsvermögens (zäh-plastisch) und der Fähigkeit/ Möglichkeit zu Risschließung und Rissverheilung sind grundsätzlich rissfreie Salzstrukturen auch in gestörter Lagerungsform zu erwarten, letztendlich belegt durch die Existenz der Salzstöcke mit Salzspiegel (= unmittelbarer Grundwasserkontakt) und der in ihnen eingeschlossenen Fluide aus der Entstehungszeit von über mehr als 200 Millionen Jahren (Zechsteinsalze). In besonderen Fällen sind jüngere fluide Phasen auch bis in begrenzte Teufe in die Salinarstruktur eingedrungen.



Bekannt sind außerdem auch nichtgeschlossene fluidgefüllte Trennflächen im Salzgebirge, die auf besonderen geologischen Einwirkungen beruhen (z.B. Basaltintrusionen mit basalt- und gasgefüllten Schnitten, kryogen (Eiszeit) bedingte salzlösungsgefüllte Klüfte).

Im Gegensatz zu den Granitgesteinsformationen und den Tongesteinsformationen liegen in Deutschland selbst und auch international jahrzehnte- bis jahrhundertelange Erfahrungen mit dem geomechanischen und dem geohydraulischen Verhalten von Salinarlagerstätten vor. Grund hierfür ist die Eigenschaft verschiedener Salze, als Rohstoff für verschiedene Industriezweige Gegenstand bergbaulicher Gewinnungstätigkeiten zu sein (Steinsalz, Kalisalze). Die geowissenschaftlichen und bergbaulichen Erfahrungen zeigen, dass chloridische Salzgesteine unter Gebirgsspannungen über geologische Zeiten flüssigkeits- und gasdicht sind, aber auch bergbaulichen Einwirkungen bis hin zu Gebirgsschlägen unter Aufrechterhaltung ihrer das Grubengebäude gegen zusitzende Grundwässer aus dem umgebenden wasserführenden Gebirge abdichtenden Funktion standhalten können. Voraussetzung hierzu sind allerdings die planerische Vorhaltung hinreichend mächtiger Abstände zu wasserführenden Gebirgsschichten extra- und auch intrasalar. Intrasalar können insbesondere bei gestörter Lagerungsform in sich geklüftete Anhydritschollen zu externen Lösungszutritten dann führen, wenn sie durch Grubenbaue angefahren werden (zu geringer Abstand bzw. unmittelbar) und aufgrund ihrer geotektonischen Position Anschluss an Grundwasser führende Schichten haben.

Die insbesondere geowissenschaftliche Erfahrung zeigt auch, dass Salztone als abdichtende Schichten gegenüber den wasserlöslichen Salzformationen fungieren und so großflächige Subrosionsprozesse verhindern. Inwieweit die Salztone allerdings halokinetische oder bergbaubedingte Deformationen ohne Einschränkung ihrer abdichtenden Wirkung vertragen, hängt insbesondere von ihrer mineralogischen Ausbildung und Zusammensetzung ab.

2.3 Kriterium K3: Das Gestein sollte unter in situ- Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen

Entsprechend der Hypothese (1) wird als eine Eigenschaft von Gesteinen, die eine nur geringe Neigung zur Rissbildung aufweisen, eine phänomenologisch als duktil charakterisierte De-



formationsfähigkeit angesehen. Diese Form der Deformationsfähigkeit äußert sich unter äußeren Lasten durch irreversible plastisch-viskose Deformationsanteile und bedingt, dass in bei linear-elastischem Materialverhalten extremal beanspruchten Tragwerksbereichen bereits bei der Lastaufnahme oder zeitnah zu der Lastaufnahme nunmehr Spannungsumlagerungen erfolgen, die die aus der Analyse mit einem linear-elastischen Stoffmodell folgenden Extremalbeanspruchungen erst gar nicht entstehen lassen bzw. reduzieren und gleichzeitig in diesen Bereichen zu verstärkten Deformationen führen. Diese sowohl eher momentan wie auch ausgeprägt zeitabhängig ablaufenden Spannungsumlagerungen erfolgen jedoch nicht grundsätzlich frei von (Mikro)Rissbildungen im Gesteinsgefüge, die verallgemeinernd als Gefügeschädigungen bezeichnet werden. Je ausgeprägt duktiler allerdings die Deformationsfähigkeit eines Materials ausgebildet ist, desto weniger sind die Deformationen von Gefügeschädigungen begleitet. Phänomenologisch sind diese Gefügeschädigungen mit einer Gefügeentfestigung und einer Gefüeauflockerung verbunden, die zu einer Zunahme/Ausdehnung des Gesteinsvolumens führt und die dann als Dilatanz bezeichnet wird. Als Dilatanzgrenze wird das Beanspruchungsniveau bezeichnet, bei dem (integral bezogen auf einen Prüfkörper) anfänglich dilatante Deformationen des Gesteins beobachtet werden. Nicht ausgeschlossen ist damit die schon vorhergehende Ausbildung von Gleitflächen mit Festigkeitsreduzierung, allerdings ohne Volumenzunahme (= geschlossene latente Trennflächen, z. B. Schieferungsflächen). Die Duktilität und auch die Dilatanzgrenze eines Materials sind abhängig von der Minimalspannung und von der Temperatur, aber auch z. B. von der Beanspruchungs- bzw. Deformationsrate. Damit werden bezogen auf die Besorgnis von Rissbildungen im Gesteinsgefüge zwei Mechanismen deutlich: einerseits die deformationsverbundene Spannungsumlagerung mit Beanspruchungsreduzierung ohne Rissbildung und andererseits die dilatanzbehaftete Deformation bei insgesamt zu hohem Beanspruchungsniveau, so dass als Kriterium 3 angesehen wird:

Kriterium K3: Das Gestein im einschlusswirksamen Gebirgsbereich weist unter in situ-Bedingungen eine plastisch- viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz auf.

Als Ausgangspunkt für die weitere Betrachtung von kriterienbezogenen Sachverhalten im Hinblick auf die Kriterienableitung sollen zunächst die Deformationseigenschaften Plastizität und Viskosität sowie die Festigkeitseigenschaft Dilatanz diskutiert werden.



Grundsätzlich hängt die Deformationsfähigkeit eines Gesteins von seinem Gefüge ab, das sich zusammensetzt aus dem Mineralbestand und der Anordnung und Verbindung der Mineralkörner.

Bei Verzicht auf eine Betrachtung des mikrostrukturellen Aufbaus und der auf dieser Ebene ablaufenden Prozesse und einer Beschränkung auf eine makroskopische Betrachtungsweise werden die aus Beobachtungen (= laborative Untersuchungen) an bis zu handstückgroßen Gesteinsprüfkörpern ermittelten Befunde entsprechend ihrem phänomenologischen Erscheinungsbild systematisiert und die Gesteine danach bestimmten Deformations-Grundformen zugeordnet. Die diesen Deformations-Grundformen zugrunde liegenden Deformationsmechanismen auf mikrostruktureller Ebene werden zwar zur Interpretation der in den laborativen Untersuchungen beobachtete Phänomene herangezogen, sind aber bislang nur in wenigen Fällen Ausgangs- oder Mittelpunkt der Stoffmodellformulierungen. Diese beruhen heute noch eher auf empirischen oder strukturrheologischen Ansätzen.

Grundsätzlich sind im Rahmen der Strukturrheologie als Deformations-Grundformen zu unterscheiden elastisches, plastisches und viskoses Materialverhalten. Dabei ist das elastische Materialverhalten charakterisiert durch Reversibilität der Deformationen und Volumenänderungen bei den Deformationen, während plastisches und viskoses Materialverhalten durch Irreversibilität der Deformationen gekennzeichnet sind mit den Unterformen einer volumenkonsistenten und einer volumenvergrößernden Deformation, die als Dilatanz bezeichnet wird. Bei vielen Gesteinen treten diese Deformations-Grundformen gleichzeitig in jeweils unterschiedlicher Intensität auf und bilden auf diese Weise unterschiedliche Mischformen.

Außerdem ist das Deformationsverhalten von Gesteinen nicht nur eine Gesteinseigenschaft, sondern auch abhängig von äußeren Bedingungen wie z.B. der Beanspruchungsart, der Beanspruchungsrate, der Temperatur oder der Feuchtigkeit (Wassergehalt). Tendenziell führen angehobene Minimalspannung, geringe Beanspruchungsrate, angehobene Temperatur und angehobene Feuchtigkeit zu einer Zunahme der Duktilität eines Gesteins, während sich anderenfalls eine zunehmende Versprödung ergibt, verbunden mit einer Zunahme der Neigung zur Rissbildung.

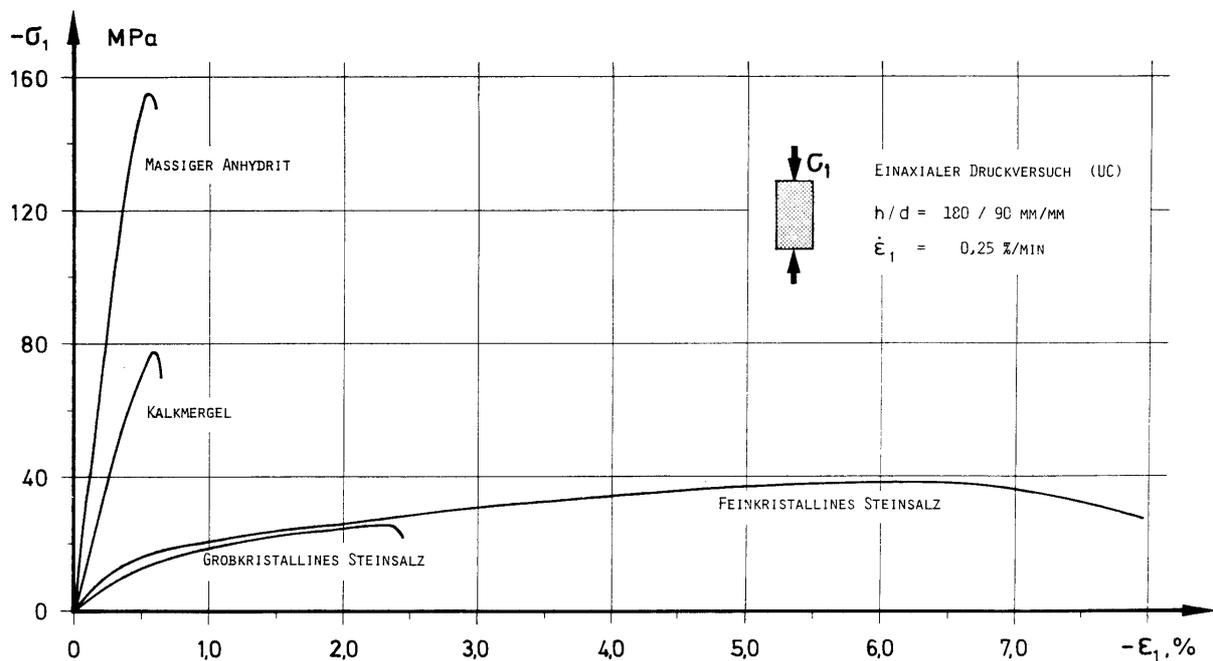


Bild 2.3: Deformationsfähigkeit verschiedener Gesteine bei einaxialer Beanspruchung und Raumtemperatur nach Lux, (1984)

Bild 2.3 zeigt charakteristische Deformationsformen verschiedener Gesteine in einem σ/ϵ -Diagramm, die sich bei einaxialer Druckbeanspruchung und Raumtemperatur sowie relativ hoher Belastungsrate von $\dot{\epsilon} \approx 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ ergeben. Dabei ist zu vermuten und dann durch entsprechende Versuche zu belegen, dass eine unter diesen Randbedingungen erhaltene ausgeprägte Duktilität im Deformationsverhalten auch mit zeitabhängigen (viskosen) Verformungen verbunden ist.

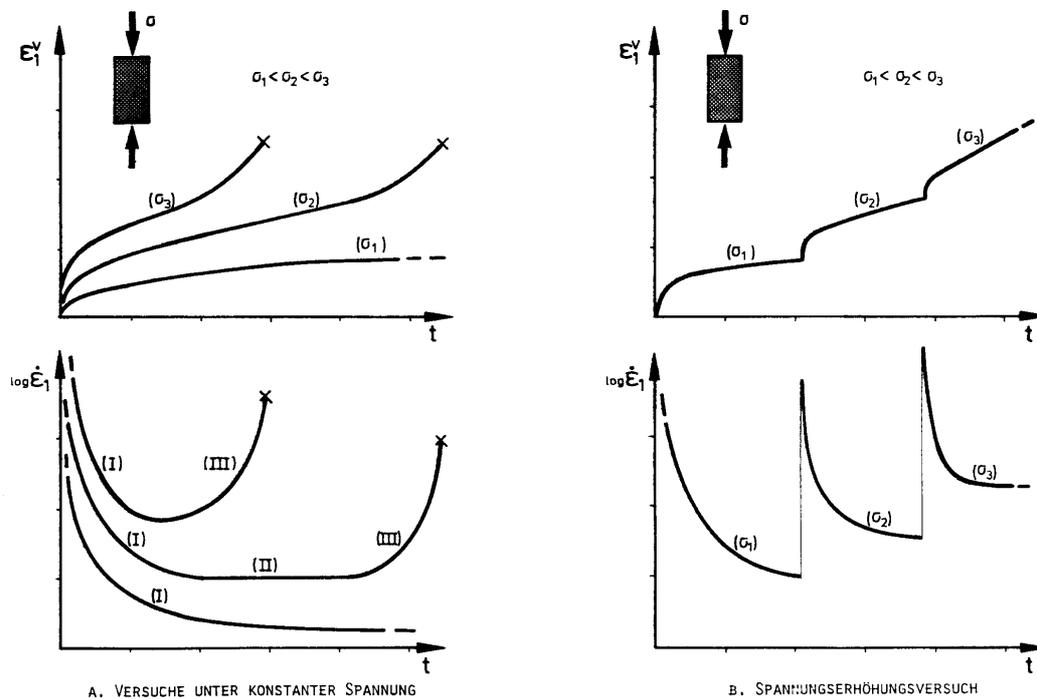


Bild 2.4: Zeitabhängiges Deformationsverhalten von Steinsalz nach Lux (1984)

Bild 2.4 zeigt dazu exemplarisch für Steinsalz die in Kriechversuchen zeitabhängig beobachteten Verformungen, die nach Aufbringen und Konstanthalten des Beanspruchungsniveaus σ_0 in Verbindung mit der Deformation $\epsilon^{cp}(t_0)$ eingetreten sind.

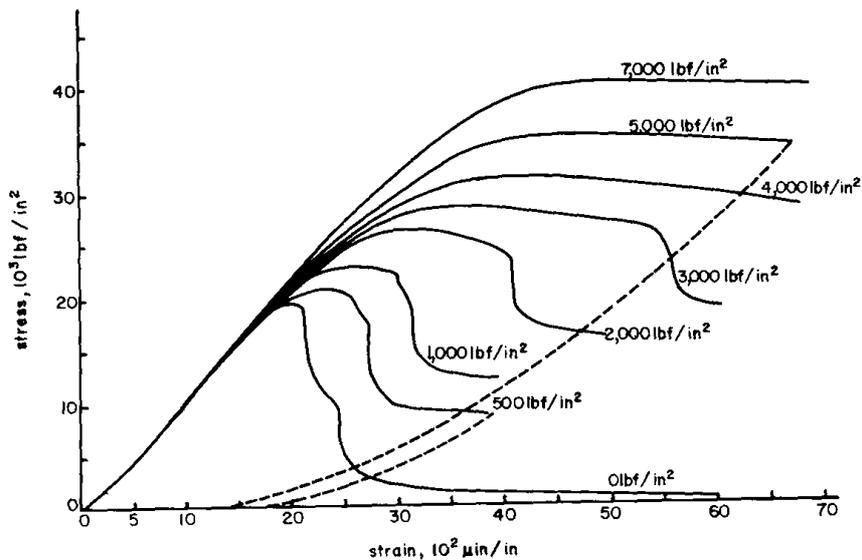


Bild 2.5: Deformationsverhalten von Marmor bei ansteigenden Minimalspannungen nach Vutukuri, Lama, Saluja (1974)



Schließlich soll Bild 2.5 die Veränderung der Materialcharakteristik bei einer Zunahme der Minimalspannung ($\hat{=}$ isotroper Spannungsanteil) für ein kristallines Gestein (Marmor) veranschaulichen. Eindrucksvoll ist zu sehen, wie mit zunehmender Minimalspannung die aufnehmbare Beanspruchung (= Festigkeit) ansteigt, der elastische Verformungsmodul (Anfangsbelastungsmodul) zunimmt und die Mikrorissbildung infolge der höheren isotropen Spannung erst bei einem größeren Beanspruchungsniveau beginnt (Plastizitätsgrenze) und weniger ausgeprägt ist, da eine Abnahme/ ein Abfall des erreichten Spitzenfestigkeitsniveaus auf ein Restfestigkeitsniveau nicht mehr erfolgt (\rightarrow Plastifizierung). Es erscheint damit auch plausibel anzunehmen, dass sich die Neubildung und Vernetzung von Mikrofissuren und ihre Aufweitung (Rissöffnung) bei Anhebung der isotropen Spannung im Vergleich zur Situation unter einaxialer Druckbeanspruchung (= Minimalspannung $\min\sigma \equiv 0$ MPa) zunehmend verringert und statt dessen die Ausbildung von beanspruchungsabhängig gerichteten, eher parallel angeordneten Gleitflächen (Scherbändern) erfolgt und damit dann zunehmend makroskopisch eine Plastifizierung des an sich als elastisch-spröde zu charakterisierenden Gesteins zu beobachten ist. Damit ist festzuhalten, dass im Grundsatz bei zunehmender Duktilität eines Gesteins, die sich in einem grundsätzlich irreversiblen, aber sowohl zeitunabhängigen (plastischen) wie auch zeitabhängigen (viskosen) Deformationsverhalten äußert, mit Rissaufweirungen verbundene Rissbildungen vermindert auftreten und in der Tendenz im Vergleich zu den elastischen Deformationen in erheblich größerem Maße bruchlose volumenkonstante Deformationen auftreten. Dabei ist ergänzend anzumerken, dass im Bereich geringer minimaler Hauptspannungen bzw. wenig angehobener Temperaturen (Vergleich: Erweichungstemperatur) vor Erreichen der Spitzenfestigkeit auch eine gewisse Plastifizierung zu beobachten ist ($\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}$). In diesem Fall sind die plastischen Deformationen allerdings auf Mikrorissbildungen zurückzuführen, so dass hier weniger ein viskoplastisches als vielmehr ein klastisch-rupturelles Verhalten mit Gefügauflockerung (Dilatanz) vorliegt.

Für aus geohydraulischer Sicht typische endlagerrelevante Gesteinstypen (geringe Matrixpermeabilität) stellt sich erfahrungsgemäß das Deformationsverhalten unter endlagerrelevanten Beanspruchungsbedingungen (Gebirgstemperatur < 100 °C) wie folgt dar:

Die verschiedenen Gesteine weisen ein sehr unterschiedliches Deformationsverhalten auf. Wichtig ist aus mechanischer Sicht im Hinblick auf das langfristige Tragverhalten insbeson-



dere die Kriechfähigkeit. Dabei sind Endlager bezogen zu unterscheiden nicht kriechfähige spröde Gesteine mit einem vernachlässigbaren Kriechverhalten, plastisch- duktile Gesteine mit einem eher geringen und Salinargesteine mit einem im Vergleich dazu stark ausgeprägten Kriechvermögen.

Bei einem Blick in das Gesteinsgefüge folgt:

- (a) *Polykristalline, nicht kriechfähige Gesteine*, zu denen die *Granitgesteine* gehören, weisen in diesem Fall ein polymineralisches und damit ein heterogenes Gesteinsgefüge auf, das aus unterschiedlichen Mineralen kleiner bis mittlerer Korngröße (Feldspat, Quarz, Glimmer) besteht, die eine vergleichsweise hohe Festigkeit haben. Deformationseigenschaften und auch Festigkeiten der verschiedenen Mineralarten sind jedoch nicht gleich groß. Aus diesem Grund entstehen unter äußerer Beanspruchung unterschiedliche Beanspruchungen und infolge behinderter Deformationsmöglichkeiten innere Zwängungsspannungen. Durch die verschiedenen Mineralkörner unterschiedlicher Größe und Form wird jedoch die freie Verformbarkeit behindert. Daher treten die unterschiedlichen Mineralien in mechanische Wechselwirkung, wobei sich Spannungsfelder ausbilden, die zu einer Verfestigung des Gesteinsgefüges führen, was zusätzlich zu einer Versprödung führt, weil bei einem Bruch aufgrund des inneren Spannungszustandes ein schlagartiges Versagen eintritt *Hertzberg (1989)*. Das Verformungsvermögen von Granit ist somit weitestgehend durch die rein elastische Deformation seiner Mineralkörner im Gefüge charakterisiert, weil durch die Behinderung der Gleitebenen und der einspannenden Wirkung der Mineralien im Gefüge untereinander kaum plastisches Gleiten entlang vorgegebener Gleitebenen möglich ist. Daraus sind das elastische Verhalten, die geringe Deformierbarkeit und die hohe Festigkeit zu erklären.
- (b) *Feinklastische Gesteine*, zu denen die *Tongesteine* gehören, bestehen zunächst definitionsgemäß aus Mineralkornpartikeln mit einer Partikelgröße $< 2 \mu\text{m}$. Der Begriff *Ton* kennzeichnet somit zunächst einen Korngrößenbereich unabhängig von den das Gestein aufbauenden Mineralarten. Darüber hinaus enthalten über die Partikelgröße als Tongesteine klassifizierte Gesteine verschiedenartige Tonminerale in unterschiedlichen Gehalten. Diese Tonminerale beeinflussen je nach Art und Gehalt die Gesteinseigenschaften. Tongesteine mit größeren Gehalten an Tonmineralen weisen im Gegensatz zu den poly-



kristallinen Gesteinen genetisch bedingt ein vornehmlich geschichtetes Mineralkorngefüge ohne unmittelbare Mineralkornbindung auf, das aus plättchenförmigen Schichtsilikaten mit umgebender Hydrathülle besteht. Je nach Tonmineralart und Kompaktionsgrad sind die einzelnen Tonmineralkörner von einer unterschiedlich dicken Hydrathülle umgeben, so dass unterschiedlich intensiv ausgebildete atomare Bindungskräfte und unterschiedliche Wassergehalte folgen. Allerdings ist hier anzumerken, dass unter dem Begriff Tongestein eine Vielzahl feinklastischer Festgesteine subsumiert werden, die auch als Tonmergelsteine bezeichnet werden könnten (= Tonsteine mit unterschiedlichen Kalkgehalten), wobei Tonsteine dann einen sehr geringen und Kalkmergelsteine/Kalksteine einen sehr hohen Kalkgehalt aufweisen. Der zunehmende Kalkgehalt führt allerdings zu einer Versprödung der Materialeigenschaften (höhere Festigkeit, geringere Deformationsfestigkeit).

Bei plastischen Tonen mit hohem Tonmineralanteil werden die Feststoffpartikel von Hydrathüllen umgeben und daher können sich bei Beanspruchungen leicht Gleitebenen ausbilden, die der Richtung der maximalen Schubspannungen folgen. Aufgrund der Hydrathüllen zwischen den Tonmineralkörnern ist die freie Bewegung zumindest größerer Teilchen im Gefüge nicht eingeschränkt, wodurch sich das ausgeprägt plastische Verhalten erklären lässt. Der Druck in dem Wasserfilm, der die Mineralschichten trennt, wird als *disjoining pressure* bezeichnet. Bei der Übertragung von Scherkräften werden die Wassermoleküle in den Hydrathüllen gegeneinander verschoben.

Damit sind aus dem Gefügebau auch die relativ geringe Festigkeit von Tonsteinen und ihre signifikante Abhängigkeit von Kompaktionsgrad/Wassergehalt sowie das plastische Verformungsvermögen zu begründen, *Horseman (1995)*.

Variationen in der Festigkeit eines Tongesteins sind allerdings nicht nur vom Kompaktionsgrad/ Wassergehalt abhängig, sondern auch aufgrund der Mineralkornzusammensetzung möglich, wobei die Festigkeit dann vornehmlich durch den Anteil an Nichttonmineralen bestimmt wird. Dabei ist in der Tendenz zu beobachten, dass die Festigkeit mit zunehmenden Tonmineralgehalt abnimmt, sich aber gleichzeitig das plastisch-duktilen Materialverhalten stärker akzentuiert, während mit abnehmendem Tonmineralgehalt die Tongesteine mehr und mehr verspröden, wobei allerdings die Festigkeit ansteigt. Tongesteine



sind daher den Deformationsformen von elastisch-spröde bis (visko)plastisch-duktil zuzuordnen, je nach Höhe des Tonmineralgehalts und auch des Kompaktionsgrades. Tongesteine mit Tonmineralgehalten von mehr als 70 % weisen eher geringe Festigkeitswerte auf. Die mechanischen Eigenschaften orientieren sich in diesen Gesteinen in erster Linie am Wassergehalt, Logan (1998). Ihr Verformungsverhalten ist dann in der Tendenz plastisch-duktil – im Gegensatz zu den Tongesteinen mit z.B. hohen Quarzgehalten². Da die plastisch-duktilen Eigenschaften durch die Hydrathüllen bedingt werden, die ein Gleiten der Mineralkörner erlauben, wird folgender Zusammenhang verständlich: Je kleiner der Tonmineralanteil ist, desto weniger Hydrathüllen sind im Gefüge vorhanden (→ abnehmender Wassergehalt) und um so eher sind die Nichttonmineralpartikel geochemisch gebunden, so dass die Gleitfähigkeit abnimmt und die Materialeigenschaften immer mehr in die elastisch-spröde Deformationsform übergehen.

- (c) *Chloridische Salinargesteine* schließlich verfügen über ein polykristallines Mineralkorngefüge mit Korngrößen von fein- bis grobkörnig (mm- bis cm-Bereich) und sind entweder monomineralisch aus nur einem Salzmineral oder polymineralisch aus verschiedenen Salzmineralen aufgebaut. Außerdem sind inter- oder intrakristallin in das Mineralkorngefüge anhydritische oder tonige Beimengungen (Verunreinigungen) eingebaut. Insbesondere diese Beimengungen verändern aufgrund ihrer Menge und ihrer Verteilung das dem jeweiligen Gestein zugeordnete mechanische Verhalten. Tendenziell weisen feinkörnige Salinargesteine eine größere Festigkeit und auch eine größere Deformationsfähigkeit auf, während grobkörnige Salinargesteine eher geringere Festigkeiten und auch geringere Bruch- bzw. Kriechbruchverzerrungen zeigen. Dispers verteilte Beimengungen an Fremdmineralen wie z.B. von Anhydrit- oder Tonpartikeln auf den Korngrenzen führen grundsätzlich zu einer Zunahme der Festigkeit und einer Verringerung des Kriechvermögens. Beispielhaft enthält das jüngere Steinsalz (Na₃ - Leinsteinsalz) im Gegensatz zum älteren Steinsalz (Na₂-Staßfurtsteinsalz) genetisch bedingt tendenziell gleichmäßig fein-

² Tongesteine variieren in ihren Quarzgehalten von wenigen % bis zu 95%, weshalb zu einer genauen Einstufung und zur Interpretation des phänomenologisch beobachteten Materialverhaltens von Tongesteinen eine Mineralbestandsanalyse vorgenommen werden muss.

disperse Beimengungen an Fremdmineralen, so dass aus diesem Befund auch die im Grundsatz geringere Kriechfähigkeit des jüngeren Steinsalzes zu erklären wäre. Älteres Steinsalz dagegen, bei dem aufgrund von plastischer Umformung und Rekristallisation ein Kristallgefüge mit größeren Kristallen und an den Korngrenzen abgesetzten Verunreinigungen und Beimengungen entstanden ist, weist tendenziell eine größere Kriechrate im Vergleich zu jüngerem Steinsalz auf. Dabei sind im Einzelfall Abweichungen von dieser bergbaulichen Erfahrung möglich, *Hunsche und Schulze, 1994*.

Die Schädigungsentwicklung ist in laborativen Untersuchungen bei hohen Minimalspannungen im (quasi-)isotropen Spannungszustand deutlich geringer als bei niedrigen Minimalspannungen im (quasi-)einaxialen Beanspruchungszustand. Prinzipiell zu erwartende Rissformen als Gefügeelemente zeigt Bild 2.6 für einen Prüfkörper, *Chan (1994)*:

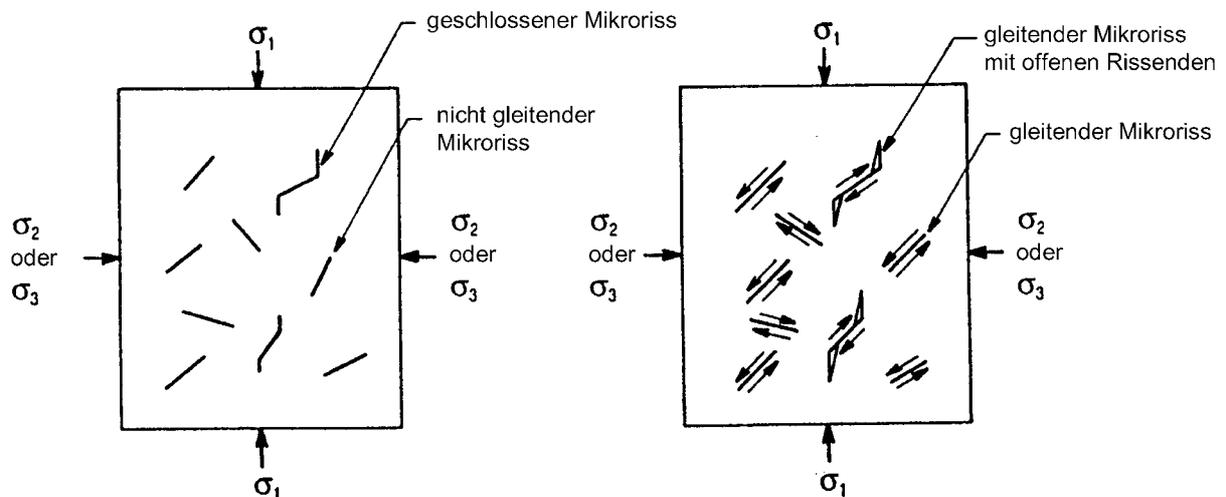


Bild 2.6: Prüfkörper im (quasi-)isotropen und (quasi-)einaxialen Beanspruchungszustand nach *Chan (1994)*

Über die skizzierten und mit Blick auf das jeweilige Gesteinsgefüge plausibel erscheinenden generellen Unterschiede im Materialverhalten hinaus ergibt sich jedoch auch eine grundsätzliche Gemeinsamkeit:



Die betrachteten Gesteinsgruppen weisen bei Beanspruchung nach Überschreitung eines gesteinsabhängigen Schwellenwertes eine Volumenvergrößerung des Gesteinsgefüges auf, die auf die Ausbildung von Rissen im Gefüge zurückzuführen ist. Dieser Schwellenwert in der Beanspruchungsintensität wird als Dilatanzfestigkeit oder Dilatanzgrenze bezeichnet.

Die Dilatanz ist damit ein Maß, mit dem integral die Intensität der Rissbildung und damit die Intensität der Schädigung des Gesteinsgefüges in Abhängigkeit von der Beanspruchung quantifiziert werden kann. Dabei wird angenommen, dass die messtechnisch an Prüfkörpern ermittelte Volumenvergrößerung ursächlich auf die Rissbildungen im Gesteinsgefüge zurückgeführt werden kann. Nicht vergessen werden darf allerdings, dass Schädigung und Dilatanz nicht identisch sind, da auch mechanische Schädigungen des Gefüges denkbar sind, bei denen keine Volumenvergrößerung eintritt. Es handelt sich dabei um im Sinne der Plastizitätstheorie volumentreue Gleitungen an Korngrenzen oder Scherbändern, die zwar eine mechanische Schädigung des Gesteinsgefüges darstellen können, d.h. Reduktion der Festigkeit und Erhöhung der Verformbarkeit, nicht aber in gleichem Maße auch eine Zunahme der Permeabilität bedingen.

Zur Illustration zeigt Bild 2.7 die gemessene Dilatanz und das dazugehörige Spannungs-/Verzerrungsdiagramm verschiedener Gesteine bei triaxialer Druckbeanspruchung. Die Minimalspannung beträgt einheitlich zur Vergleichbarkeit $\min\sigma = 2,0$ MPa. Daraus sind folgende Befunde zu entnehmen:

- Anhydrit (stellvertretend für elastisch-sprödes Kristallingestein): Vor dem makroskopischen Bruch bei vergleichsweise großer Spitzenfestigkeit in der Größenordnung von $\beta_1 = 100$ MPa stellt sich nahezu keine Dilatanz ein, sondern es ist nur eine elastische Kompaktion zu verzeichnen. Die Dilatanz ist damit im wesentlichen auf den Nachbruchbereich beschränkt.

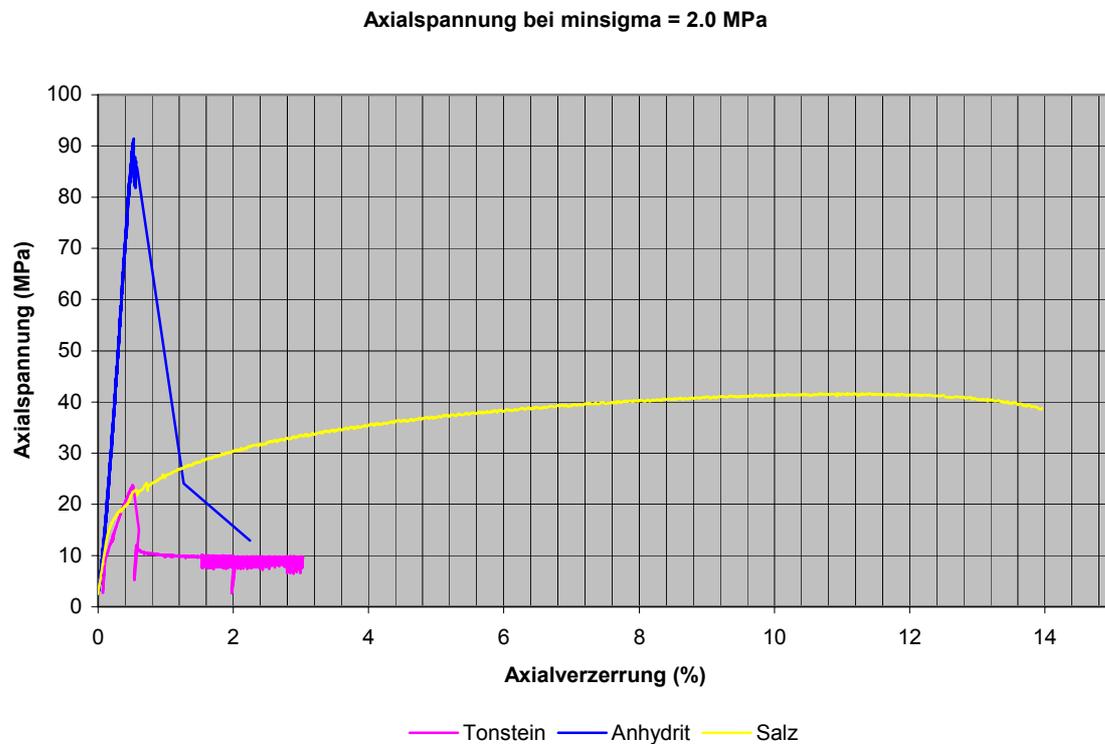
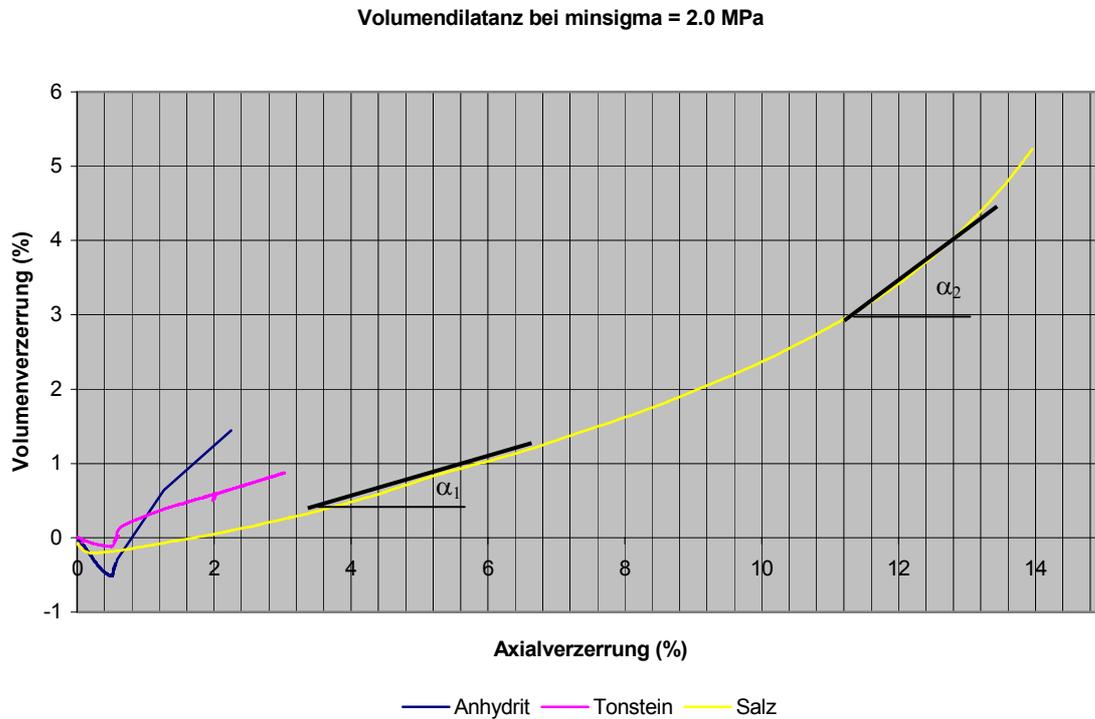


Bild 2.7: Dilatanz und zugehöriges Spannungs- /Verzerrungsdiagramm bei verschiedenen Gesteinen (eigene Untersuchungsbefunde)



- Tonstein (elastisch-sprödes, leicht plastische/viskoses feinklastisches Sedimentgestein):
Bei dem untersuchten Material mit einer Bruchfestigkeit von $\beta_1 \approx 25$ MPa ergibt sich ein nichtlinearer Deformationsverlauf im Vorbruchbereich, der ab einem Beanspruchungsniveau von $\sigma_1 \approx 15$ MPa auf Mikrorissbildungen im Gebirge schließen lässt, die die elastische Kompaktionsrate zwar reduzieren, aber vor Erreichen des makroskopischen Bruches noch nicht überwiegen. Im Nachbruchbereich ergibt sich zunächst eine nahezu sprunghafte Zunahme der Dilatanz, verbunden mit einem Abfall des Beanspruchungsniveaus von der Spitzen- auf die Restfestigkeit. Danach folgt bei einer konstanten Restfestigkeit von $\beta_R \approx 10$ MPa ($\min\sigma = 2$ MPa) eine Deformation mit konstanter Dilatanzrate, also eine mit der Axialstauchung linear zunehmende Dilatanz.
- Steinsalz (elastisch-viskoses polykristallines chemisches Sedimentgestein(Salzgestein)):
Nach einer anfänglichen elastoplastischen Kompaktion bis zu einem Beanspruchungsniveau von $\sigma_1 \approx 12$ MPa ergibt sich bei weiterer Beanspruchungssteigerung eine von zunehmender Dilatanz begleitete Deformation. Die Spitzenfestigkeit von $\beta_1 = 42$ MPa wird nach einer Verzerrung von $\bar{\varepsilon}_{1f} \approx 11$ % erreicht, während bei den anderen Gesteinen im Bruchzustand eine Verzerrung von nur $\bar{\varepsilon}_{1f} \approx 0,5$ % erreicht wurde. Auch ist bei Steinsalz kein nahezu momentaner Abfall der Spitzenfestigkeit auf Restfestigkeitsniveau zu beobachten. Vielmehr erfolgt ein langsamer, ganz allmählicher Übergang in den Nachbruchbereich. Dabei steigt die Dilatanzrate kontinuierlich an, so dass die Dilatanz überlinear zunimmt.

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen exemplarisch eindrucksvoll, wie unterschiedlich sich die verschiedenen Gesteinsarten in ihrem Materialverhalten bezüglich Rissbildung präsentieren. Bei einer zahlenmäßigen Charakterisierung dieser Untersuchungsergebnisse folgt nach Bild 2.7 für $\sigma_3 = 2$ MPa:

Anhydrit	Vorbruchbereich	$\psi \Rightarrow 0^\circ$
	Nachbruchbereich	$\psi_R \Rightarrow 22,6^\circ$
Tonstein	Vorbruchbereich	$\psi \Rightarrow 0^\circ$
	Nachbruchbereich	$\psi_R \Rightarrow 8,8^\circ$



Steinsalz	Vorbruchbereich	$\psi \Rightarrow 6,4^\circ$
	Nachbruchbereich	$\psi_R \Rightarrow 13,8^\circ$

Über diese Versuchsergebnisse hinaus ist festzustellen, dass tendenziell die Dilatanz mit zunehmender Minimalspannung abnimmt. Dabei steigt einerseits die Dilatanzfestigkeit, die phänomenologisch mit dem Minimum der Volumenkompression verknüpft wird und andererseits reduziert sich der Dilatanzwinkel, der definiert ist in folgender Form:

$$\psi = \arcsin(\varepsilon_{\text{vol}} / (\varepsilon_{\text{vol}} - 2\varepsilon_1)) \quad (2.8a)$$

für triaxiale Kompressionsversuche (TC) bzw. triaxiale Extensionsversuche (TE)

mit

ε_{vol} Volumendehnung, -

ε_1 maximale Hauptverzerrung, - ($\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$)

Für die Ableitung der Dilatanzwinkels aus vorstehenden laborativen Befunden erscheint folgende Darstellung vorteilhaft:

$$\tan\alpha = \Delta\varepsilon_{\text{vol}}/\Delta\varepsilon_1 \quad \rightarrow \quad \sin\psi = \tan\alpha/(2+\tan\alpha) \quad (2.8b)$$

Wird die Dilatanzkurve im durch eine oder zwei Geraden mit den Anstiegswinkeln α_1 bzw. α_2 approximiert, dann kann aus diesen Anstiegswinkeln der Dilatanzkurve für die Bedingung eines triaxialen Kompressionsversuchs der zugehörige Dilatanzwinkel über die zwei Beziehungen in Gl. (2.8b) berechnet werden, *Hou (2002)*.

Ein Dilatanzwinkel von $\psi = 0$ bedeutet, dass keine Dilatanz auftritt. Bild 2.7 zeigt auch, dass der Dilatanzwinkel während des Beanspruchungsvorganges nicht konstant sein muss, sondern sich mit zunehmender Deformation vergrößern kann (= Anstieg der Dilatanzrate).

Gesteine mit einem geringen Dilatanzwinkel im Vorbruchbereich ($\psi \rightarrow 0,0$) zeigen ein Verhalten, dass eine eher geringe Neigung zur Rissbildung vor dem eigentlichen makroskopi-



schen Bruch (Überschreitung der Bruchfestigkeit bei spröden Bruch oder der Bruchdeformation bei duktilen Bruch) erwarten lässt.

Beanspruchungen unterhalb der Dilatanzgrenze sind integral nicht mit der Neubildung oder Erweiterung von geohydraulisch wirksamen Rissen verbunden, sondern bei einer Druck-/Schubbeanspruchung mit einer Materialkompaktion, die eher noch zu einer Verschließung bereits vorhandener Porenräume führen könnte. Solange also die Beanspruchung unterhalb der Dilatanzfestigkeit bleibt, sind integral keine geohydraulisch wirksamen Risserweiterungen und Rissbildungen zu besorgen.

Elastisch- spröde Gesteine mit ihrer relativ gering ausgeprägten Deformationsfähigkeit gehen nach einer Kompaktionsphase bei beginnender Überschreitung der Kornverbands- oder auch Kornfestigkeit (mit der zunehmenden Ausbildung intra- oder interkristalliner Fissuren) dann in die Phase dilatanter Deformation über (Mikroschädigungen mit Dilatanz) – allerdings erst bei einem relativ hohen Beanspruchungsniveau bezogen auf die Bruchfestigkeit und auch beschränkt auf diskrete Bereiche extremaler Beanspruchung im Gestein. Das makroskopische Versagen erfolgt schließlich nach Rissvernetzung und Ausbildung einer oder mehrerer Bruchflächen als ein spröder Bruch nach einer nur relativ geringen Deformation des Gesteins.

Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzgrenze sind damit immer an eine Erhöhung der Mikrorissdichte im Gestein gekoppelt, wobei an den Spitzen bestehender Mikrorisse Spannungskonzentrationen entstehen und die Risse bei weiterer Belastung vergrößert werden, bis sie schließlich zusammenwachsen. Bereits im Kristallkorngefüge vorhandene Fehlstellen bilden so vornehmlich den Ausgangspunkt für Risserweiterungen und werden zu einem vernetzten Rissystem zusammengeschlossen, weil hierzu weniger Energie benötigt wird als für die Initiierung von neuen Rissen, *Janach (1977)*.

Daraus folgt, dass sich elastisch- spröde Gesteine aufgrund ihrer gering ausgeprägten Deformationsfähigkeit eher nicht volumentreu verformen und nach einer Kompaktionsphase bei beginnender Überschreitung der Kornverbands- oder auch Kornfestigkeit (mit der zunehmenden Ausbildung intra- oder interkristalliner Fissuren) dann in die Phase dilatanter Deformation übergehen (Mikroschädigungen mit Dilatanz). Das makroskopische Versagen erfolgt schließlich nach Rissvernetzung und Ausbildung einer oder mehrerer Bruchflächen als ein spröder Bruch nach einer nur relativ geringen Deformation des Gesteins.



Plastisch- und viskoplastisch-duktiler Gesteine dagegen können Deformationen in hohem Maße über Gleitvorgänge entlang von gefügebedingt inter- oder intrakristallinen vorgezeichneten Gleitebenen auflockerungsfrei, d.h. ohne Risse mit Aufweitungen und damit volumentreu ertragen, wobei sie in ihrem Gefüge mechanisch zwar auch geschädigt werden können, aber eben nicht zwangsläufig auch Dilatanz aufweisen müssen. Weiterhin ist hervorzuheben, dass die sich im Gefüge ausbildenden Mikrorisse nach Überschreiten der Dilatanzgrenze auch noch nicht unmittelbar vernetzte Rissysteme bilden. Vielmehr bilden sich an verschiedenen Stellen im Gestein plastisch-viskos verformte Zonen aus, wobei dann erst deren Vernetzung nach weiteren Deformationen zum Bruch führt, *Saxena (1998)*.

Plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz bedeutet also, dass plastisch-viskose Deformationen schädigungsfrei oder schädigungsbehaftet mit einer volumentreuen Verformung des Gesteins verbunden sind und aufgrund der plastisch-viskosen Eigenschaften Spannungsumlagerungen im Material erfolgen, die in extremal beanspruchten Bereichen zu einer Beanspruchungsreduzierung führen bei gleichzeitig verstärkter inelastischer Deformation. Damit müssen Schädigungen des Mineralkorngefüges nicht grundsätzlich auch Dilatanz hervorrufen und Dilatanz bedeutet auch nicht generell eine Erhöhung der Permeabilität, weil sich Risse/ lokale Rissysteme nicht zwangsläufig bei Überschreitung der Dilatanzfestigkeit gleichmäßig über einen größeren Gesteinsbereich vernetzen müssen, sondern weil sich auch zunächst noch lokal begrenzte Risszonen ausbilden können, die sich erst mit weiter zunehmender Deformation bei anhaltender Lasteinwirkung untereinander verbinden. Das Bruchversagen erfolgt als duktiler (Gleit-)Bruch.

Zusammenfassung mit Blick auf die Formulierung eines Bewertungsmaßstabes:

Anhand der verschiedenen phänomenologischen Deformationsformen und ihrer Herleitung aus der Systematisierung laborativer Befunde unter Heranziehung der auf mikrostruktureller Ebene ablaufenden Prozesse bei den verschiedenartigen Gesteinen und ihren prinzipiell unterschiedlichen Gefügen ist gezeigt worden, dass für die Ableitung eines Bewertungsmaßstabes zur Operationalisierung des Kriteriums ***Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz*** eine grundsätzliche Betrachtung eher nicht ausreichend sein wird, sondern die Deformationseigenschaften jedes einzelnen der zu bewertenden Gesteine ermittelt werden müssen. Diese Forderung gilt insbesondere für die Tongesteine angesichts der großen Bandbreiten ihrer stofflichen Zusam-



mensetzung und der Abhängigkeit der Deformationseigenschaften von der Vorgeschichte. Allerdings ist für die Gesteinsgruppen Granitgestein, Tongestein und Salzgestein eine grob orientierende Zuordnung zu Deformations-Grundformen möglich:

- Granitgesteine → linear elastisch-spröde,
- Tongesteine → linear elastisch-plastisch bis linear elastisch-viskoplastisch mit Entfestigung je nach Mineralbestand (z.B. Quarzgehalt, Kalkgehalt) und Kompaktionsgrad (Wassergehalt),
- Salzgesteine → elastisch-viskos mit unterschiedlicher Viskosität und zunehmender Duktilität bei abnehmender Beanspruchungsrate je nach Mineralart, Mineralzusammensetzung, Mineralkorngröße und Fremdeinschlüssen.

Die Formulierung von kriterienbezogenen Bewertungsmaßstäben erscheint auf verschiedenen Betrachtungsebenen möglich:

(a) Qualitative Betrachtungsebene (Übertragung von grundsätzlichen Erfahrungen):

- Angabe des Gesteinstyps als Hinweis auf für die Mineralkornzusammensetzung.

Aus der Mineralkornzusammensetzung folgt die Zuordnung zu dem

- grundsätzlichen Materialtypus (spröde, duktil) sowie zu dem
- Deformationsgrundtyp (elastisch/ spröde, elastisch-pseudoplastisch mit eher momentaner Entfestigung, elastisch-viskoplastisch/ duktil mit eher allmählicher Entfestigung, elastoviskos/ duktil)

(b) Quantitative Betrachtungsebene (standortbezogene laborative Untersuchungen):

- Ermittlung der absoluten Dilatanzfestigkeit (Maß für die mikrorissfreie Beanspruchungsintensität)
- Ermittlung des Dilatanzwinkels (→ Maß für die Rissbildungsintensität = Gefügauflockerung)
- Ermittlung der Größe der inelastischen Deformationen im Vergleich zu der Größe der elastischen Deformationen an der Dilatanzgrenze (→ Maß für die Duktilität ohne riss-behaftete Gefügeveränderung):



$$\varepsilon^{ie} > \varepsilon^{el} \text{ für } \text{vorh}\eta = \eta_{Dil} \quad (2.9)$$

2.4 Kriterium K4: Klüfte/ Risse werden bei Beanspruchungsinversion geohydraulisch wirksam verschlossen

Entsprechend den Hypothesen (2) und (4) kann eine geringe Neigung zur Rissbildung bei einem Gestein dann eingeschätzt werden, wenn das Gestein in laborativen Untersuchungen nach einer Gefügeschädigung mit Permeabilitätszunahme mit dann allerdings geänderten Beanspruchungsbedingungen (= zunehmende isotrope Beanspruchung bei abnehmender deviatorischer Beanspruchung) eine reversible Sekundärpermeabilität aufweist. Der Bezug zur Situation im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist dadurch gegeben, dass die im unverritzten Gebirge zunächst vorhandene sogenannte Primärpermeabilität beanspruchungsbedingt (technogen, geogen) durch Mikrorissbildungen angestiegen ist und dadurch von einer Verschlechterung der Barrierenwirksamkeit des Gefüges auszugehen ist. Diese nunmehr als Sekundärpermeabilität bezeichnete Gesteinspermeabilität ist bei manchen Gesteinen irreversibel, bei anderen reversibel, d.h. sie bildet sich unter entsprechend veränderten Beanspruchungsbedingungen zurück, im Idealfall bis auf das Niveau der Primärpermeabilität. Diesen Rückbildungsprozess begünstigende bzw. überhaupt erst ermöglichende Beanspruchungsbedingungen liegen vor, wenn sich die minimale Gebirgsspannung vergrößert und die deviatorische Gebirgsbeanspruchung vermindert. Diese Beanspruchungssituation ergibt sich z.B. in der Konturzone eines Grubenbaus, wenn sich im Bereich eines Dammbauwerkes oder eines Schachtverschlussbauwerkes durch konvergente Gebirgsbewegungen ein radialer Stützdruck in der Kontaktfläche Abdichtungsbauwerk-Gebirge aufbaut oder nach Verfüllung einer Strecke mit Fremd- oder Eigenversatz ebenfalls durch konvergente Gebirgsbewegungen und dadurch bedingte Versatzkompaktion ein radialer Stützdruck entsteht. Die gleiche Situation für das dilatante und mit einer Sekundärpermeabilität behaftete konturnahe Gebirge ergibt sich, wenn ein radialer Stützdruck durch ein quellendes Abdichtungselement und den dabei entstehenden Quelldruck induziert wird. Eine Risschließung ist dagegen z.B. auch im Bereich von Querschnittsabdichtungen ohne Einsatz von Fremdmaterial (Injektion) nicht zu erwarten, wenn sich das konturnahe Gebirge unter der einwirkenden Beanspruchung aus Errichtung und Betrieb nicht mehr deformiert und auch keine Abdichtungsmaterialien mit Quellvermögen ein-



gesetzt werden, so dass sich weder ein passiver noch ein aktiver Kontaktflächendruck aufbaut. Aber selbst bei einem ausreichenden Stützdruck des Widerlagers, zum Beispiel bei Verwendung quellfähiger Dammbaumaterialien, ist bei Gesteinen mit großer Festigkeit eine signifikante Reduzierung der konturnahen Sekundärpermeabilität aufgrund einer nicht auszuschließenden Brückenbildung in den Rissen nicht sicher prognostizierbar.

Trotz eines planerisch durch das Endlagerdesign (z.B. Geometrie, Abfallbeschaffenheit, Abfallablagerungsdichte, Wärmefreisetzung) grundsätzlich möglichen Ausschlusses von großräumigen Rissbildungen im Gebirge, die über die konturnahen Bereiche hinausgehen, sind dennoch und im Grundsatz unvermeidbar konturnahe Auflockerungszonen mit der Ausbildung einer Sekundärpermeabilität zu besorgen. Daher erscheinen Gesteine vorteilhaft, bei denen bei zu erwartender Beanspruchung oberhalb der Dilatanzgrenze die grundsätzliche Tendenz besteht, dass die Sekundärpermeabilität zumindest in einem nicht nur marginalen Maße unter den jeweiligen Feldbedingungen in Verbindung z.B. mit der Anordnung von Abdichtungsbauwerken reversibel ist und in denen damit geohydraulisch wirkungsvolle geotechnische Barrieren errichtet werden können, so dass als Kriterium 4 angesehen wird:

Kriterium K4: Klüfte/ Risse im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen (→ Rückbildung der Sekundärpermeabilität).

Die Auffahrung eines Hohlraumes im Gebirge ist im Grundsatz verbunden mit Beanspruchungskonzentrationen entlang der Hohlraumkontur und als Folge mit der Ausbildung einer mehr oder weniger ausgeprägten Auflockerungszone entlang der Hohlraumkontur, die eine im Gegensatz zum umliegenden Gebirge erhöhte primäre Permeabilität aufweist, die als Sekundärpermeabilität bezeichnet wird. Bedingt ist die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität durch

- den Sekundärbeanspruchungszustand infolge der Ausbruchskräfte und weiterer Einwirkungen bei Überschreitung der Dilatanzfestigkeit sowie
- ausbruchsverfahrensabhängige Gefügeentfestigungen (z.B. beim Bohr- und Sprengverfahren).



Für die Beschreibung von diesem Kriterium zugeordneten Sachverhalten müssen einerseits die Mechanismen im Gestein betrachtet werden, die mehr oder weniger unvermeidbar zur Erhöhung der Permeabilität führen. Andererseits sind die Vorgänge zu diskutieren, die später zur Reduktion der Sekundärpermeabilität führen können. Dazu müssen auch die Bedingungen für die dazu notwendige Erhöhung der minimalen bzw. isotropen Spannung skizziert werden.

Als eine Grundvoraussetzung für die Eignung eines Gesteinstyps als Barrierengestein müssen die zu betrachtenden Gesteine a priori über eine außerordentlich geringe effektive Porosität verfügen, d.h., dass das Gesteinsgefüge in Verbindung mit dem anstehenden primären Gebirgsdruck im Grundsatz als geologisch dicht anzusehen ist oder mit anderen Worten: Das Barrierengestein muss über geologische Zeiträume undurchlässig bzw. hinreichend gering durchlässig sein für Flüssigkeiten und Gase. Gesteine mit einer nicht von vornherein vorhandenen hinreichend geringen effektiven Porosität sind von den weiteren Betrachtungen auszuschließen, da grundsätzlich ein hinreichend geringe Permeabilität für die Barrierengesteine gefordert wird und die effektive Porosität mit der Permeabilität in enger gesteinsartabhängiger nichtlinearer Beziehung steht. Strömungsbezogene mechanische und hydraulische Prozesse im Gestein sind dabei über die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung verknüpfbar (MH-Kopplung), wobei mechanisch bedingte Änderungen der effektiven Porosität zu Änderungen der Permeabilität und damit der geohydraulischen Eigenschaften führen, aber dann auch wiederum über die induzierten Strömungskräfte auf den mechanischen Prozess Einfluss nehmen (MH-Wechselwirkung, *Xie (2002), Lux et al. (2002)*).

Gesteine mit nur geringer Primärpermeabilität können allerdings auch Zonen mit erhöhter Sekundärpermeabilität aufweisen, die in einem unverritzten Gebirge auf geogene Beanspruchungen oberhalb der Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeitsgrenze zurückzuführen sind. Hier ist allerdings vorausgesetzt, dass geogene Beanspruchungen nicht zur Ausbildung eines Trennflächengefüges geführt haben und somit sowohl aus geomechanischer wie auch aus geohydraulischer Sicht Gebirgseigenschaften und Gesteinseigenschaften identisch sind. Für die hier vorzunehmenden Betrachtungen soll eine Reduktion auf zukünftige technogene Einwirkungen ausreichend sein: Durch das Auffahren eines Grubengebäudes wird infolge der Geometrieänderung des Tragsystems der Primärspannungszustand des Gebirges gestört, wobei sich entlang der Kontur der Grubenbaue und in einem je nach Grubenbaugröße und Durchbauungs-



grad unterschiedlich weit in das Gebirge hineinreichenden Bereich ein Sekundärspannungszustand infolge der aktivierten Ausbruchskräfte einstellt. Aufgrund des Sekundärspannungszustandes entstehen bei Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzgrenze unvermeidbare Entfestigungen und dann auch Auflockerungen im Gesteinsgefüge, die zur Öffnung von bestehenden latenten Trennflächen und zur Neubildung von Rissen führen. Verstärkt werden kann die Gebirgsbeanspruchung durch abfallbedingte Einwirkungen, z.B. thermisch induzierte Spannungsänderungen und Änderungen der Materialeigenschaften des Gebirges. Diese Auflockerungszonen sind in ihrer Größe und Intensität damit abhängig einerseits von den Einwirkungen infolge Auffahrung und Betrieb des Bergwerkes, andererseits sind sie aber auch abhängig von den Materialparametern des Gesteins. Aufgrund der technogenen Beanspruchung wird sich in der entfestigten Auflockerungszone um die Grubenbaukonturen eine gegenüber der primär vorhandenen erhöhte Permeabilität einstellen und zwar die durch sekundäre Beanspruchungszustände verursachte Sekundärpermeabilität.

Sekundärpermeabilitäten sind als Folge sekundärer Gebirgsbeanspruchungen damit zurückzuführen auf

(a) rupturrell bedingte Änderungen des Mineralkorngefüges z.B. durch

- (1) Zugspannungen, die die Zugfestigkeit des Gebirges überschreiten und/ oder
- (2) Druck-/ Schubbeanspruchungen, die die Dilatanzfestigkeit überschreiten und dazu führen, dass sich in Verbindung mit und in Überprüfung der ablaufenden Deformationsprozesse latente Trennflächen öffnen, vorhandene Risse ausbreiten oder neue Risse ausbilden sowie

(b) nicht rupturrell bedingte Änderungen der Fließwegquerschnitte z.B. durch

- (3) Mobilisierung von Haftwasser infolge strömungsinduzierter Porenwasserdruckänderungen, Temperaturänderungen oder Änderungen des geochemischen Milieus (z.B. kontaminierte Wässer mit Lösungswirkung auf die Mineralkornsubstanz).

Dabei sind infolge mechanischer Einwirkungen grundsätzlich konturnahe Gebirgsauflockerungen zu erwarten, aber auch konturfernere Gebirgsauflockerungen/ Rissbildungen sind nicht grundsätzlich auszuschließen. Derartig betroffene Gebirgsbereiche innerhalb (und auch außerhalb) des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Barriere im engeren Sinn) sind rech-



nerisch zu ermitteln und bei der Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. weiterer geologischer Barrieren durch entsprechende Reduzierung zu berücksichtigen.

Rissbedingte Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen Auflockerungszone z.B. infolge von extremen Durchbauungsgraden oder von thermisch bedingten Beanspruchungen sind zwar nur bei entsprechend ungünstigen Bedingungen (z.B. Geometrie, Materialeigenschaften, mechanische und thermische Lasten) zu erwarten, jedoch auch nur aufgrund computergestützter Simulationen zum Tragverhalten des Endlagerbergwerkes in ihrer Entstehung zu prognostizieren und ohne erhebliche Eingriffe in das Gebirge nicht vermessbar und bedingen daher zusätzliche, bei allerdings entsprechender Planung von Endlager/ Endlagersystem grundsätzlich vermeidbare Barrierenschwächungen und darüber hinaus zusätzliche Unsicherheiten in Sicherheitsanalysen.

Grundsätzlich gilt daher die Forderung, dass die durch Auffahrung von Grubenbauen und weiteren technogenen Einwirkungen gebildeten Auflockerungszonen, die wiederum mit einer Erhöhung der Sekundärpermeabilität im angrenzenden Gebirge verbunden sind, in ihrer räumlichen Ausdehnung möglichst begrenzt sein müssen, damit nicht von einer signifikanten Herabsetzung der Primärpermeabilität innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch weit in das Gebirge hineinreichende und im ungünstigsten Fall noch von miteinander verbundenen Auflockerungszonen ausgegangen werden muss. Somit sollte planerisch die Sekundärpermeabilität auf die unvermeidbare konturnahe Auflockerungszone der einzelnen Grubenbaue (Kammern, Strecken, Schächte) begrenzt sein, damit der einschlusswirksame Gebirgsbereich keine erhebliche Schwächung in seinem zentralen Bereich erfährt und die Qualität und Leistungsfähigkeit von im Rahmen der Stilllegung einzubauenden und die Langzeitsicherheit gewährleistenden Damm- und Verschlussbauwerken als sogenannten geotechnischen Barrieren nicht durch vorhandene technogen bedingte und nicht zu rekonstituierende Umläufigkeiten über das den Abdichtungsbauwerken benachbarte Gebirge in Frage gestellt wird.

Daraus folgt, dass die Sekundärpermeabilität eigentlich grundsätzlich, insbesondere aber im Bereich von Querschnittsabdichtungen auf einen konturnahen Gebirgsbereich und darüber hinaus in diesem konturnahen Gebirgsbereich auch in ihrer Intensität begrenzt sein sollte, d.h., in der Gebirgsformation dürfen zusätzliche technogen bedingte Wegsamkeiten nur kon-



turnah entstehen und auch nur dann, wenn ihre geohydraulische Wirksamkeit reversibel ist oder toleriert werden kann im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises/ der Genehmigungsfähigkeit, so dass die geohydraulische Wirksamkeit der geologischen Barriere und der als Damm- und Verschlussbauwerke zu errichtenden geotechnischen Barrieren nachweislich langfristig in dem erforderlichen Maße gewährleistet werden kann. Großräumige Auflockerungszonen sind durch die Endlagerauslegung planerisch auszuschließen bzw. nicht in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich einzubeziehen. Maß für die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität sind in erster Abschätzung die Größe der Dilatanzzone und die Dilatanz selbst.

Dazu bleibt festzuhalten, dass die Funktion von Damm- und Verschlussbauwerken langfristig nur dann gewährleistet ist, wenn die unvermeidbaren Auflockerungen, die geohydraulisch zu Umläufigkeiten durch das Gebirge führen, auf einen konturnahen Bereich begrenzt bleiben und sich der Beanspruchungszustand nach Einbau der Abdichtungsbauwerke (vor Lösungszutritt) dahingehend im Gebirge ändert, dass die Deviatorspannungen abnehmen und gleichzeitig die minimale bzw. isotrope Spannung im Gebirge zunimmt. Diese Änderung des Beanspruchungszustandes wird möglich, wenn sich im Bereich der Kontaktfläche Gebirge- Abdichtungsbauwerk ein Kontaktdruck aufbaut, z.B. durch konvergente Gebirgsdeformationen oder durch ein quellendes Abdichtungselement. Nur in diesen Fall des Aufbaus eines Kontaktdruckes entsprechend einem Ausbaustützdruck kann im umliegenden Gebirge eine Schließung der geöffneten Risse oder/und Trennflächen erwartet werden, falls das Gestein ein derartiges Verhalten ermöglicht (Gesteinsqualität, Beanspruchungsniveau, Zeit). Allerdings ist durch eine geeignete Planung sicherzustellen, dass sich weder im einen noch im anderen Fall Kontaktdrücke in einer Größe ausbilden, die dann zu einem Fracen des Gebirges mit der Schaffung von neuen, in diesem Fall dann radial gerichteten und sowohl radial wie auch sich axial ausdehnenden Rissen führen.

Bei einer Übertragung von Beobachtungen aus Laborversuchen auf die hier vorliegende Situation im Bereich von Querschnittsabdichtungen bzw. versetzten Grubenbauen ist eine Entlastung des Gesteins (Beanspruchungsumkehr mit Reduzierung der Deviatorspannung, Vergrößerung der isotropen Spannung, insbesondere der minimalen Hauptspannung) als Voraussetzung für die Risschließung nur dann zu erwarten, wenn



- ein aktiver Konturdruck erzeugt wird (entsprechend einem Ausbauwiderstand, z.B. durch ein quellfähiges Abdichtungselement, das in der Kontaktfläche zum Gebirge infolge behinderter Quelledehnung einen Quelldruck erzeugt) oder wenn
- ein passiver Konturdruck entsteht dadurch, dass das Gestein über ein hinreichendes plastisch-viskoses Deformationsvermögen verfügt, so dass sich durch fortlaufende konvergente Gebirgsbewegungen und viskose Spannungsumlagerungen bis zum weitgehenden Abbau der deviatorischen Gebirgsbeanspruchung ein Kontaktdruck aufbaut.

Unabhängig davon, ob die Beanspruchungsumkehr über den Aufbau eines aktiven oder eines passiven Kontaktdruckes erreicht wird, sind grundsätzlich Unterschiede im Riss-schließungsverhalten bei elastisch-spröden und bei viskoplastisch-duktilen Gesteinen zu erwarten. Ausgangspunkt für diese Diskussion ist die Tatsache, dass sich bei Rissen, die sich unter Druck- bzw. Zug-/ Schubbeanspruchung gebildet haben, die Rissflächen nicht nur öffnen, sondern auch gegeneinander versetzt werden, so dass die Rissflächen bei einer nachfolgenden Kompressionsbeanspruchung und der damit verbundenen Rissweitenverkleinerung bis hin zur Riss-schließung geometrisch von ihrer nunmehr ungleichen Oberflächenstruktur her nicht mehr formschlüssig zueinander passen.

Grundsätzlich wird damit deutlich, dass bei zumindest vorübergehender Tolerierung einer unvermeidbaren Gebirgsauflockerung gewährleistet werden muss, dass die Langzeitsicherheit des Endlagerbergwerkes nicht durch die Ausbildung von Auflockerungszonen mit dauerhaft erhöhter Sekundärpermeabilität in unzulässigem Maße beeinträchtigt wird. Die grundsätzlichen Möglichkeiten der geohydraulisch wirksamen Riss-schließung sollen daher nachstehend gesteinsartbezogen diskutiert werden.

(a) *Elastisch-spröde Gesteine*

Elastisch-spröde Gesteine verfügen nur über sehr geringe bis verschwindende Kriecheigenschaften. Damit sind keine bzw. nur sehr geringe Konvergenzen in Grubenbaue hinein zu erwarten, so dass dann auch ein Damm- oder Verschlussbauwerk oder auch ein Streckenversatz keine oder eine nur geringe Stützung der Gebirgskontur bewirkt. Der Aufbau eines hinreichend großen passiven Stützdruckes muss in diesem Fall verneint werden. Eine für die Riss-



schließung relevante Belastungsumkehr in den entsprechenden Gebirgsbereichen (Querschnittsabdichtung, Streckenversatz) ist auf diese Weise nicht zu erwarten.

Bei einer durch einen als hinreichend groß vorausgesetzten aktiven Kontaktdruck bedingten Kompressionsbeanspruchung und einer dadurch herbeigeführten Verkleinerung der Rissweiten ist davon auszugehen, dass sich zunächst einzelne (nicht plastisch deformierbare) Mineralkörner berühren und somit in den Rissen eine Brückenbildung erfolgt, über die die Kontaktdrücke übertragen werden können. Je nach Mineralkornfestigkeit können dabei lokal mehr oder weniger ausgeprägte neue Rissbildungen (Brüche) auftreten. Dabei können sich auch Mineralkörner oder Teile von ihnen aus dem Gefüge bruchhaft herauslösen und zu weiteren Brücken führen. Ein geohydraulisch reversibles Schließen der ursprünglich entstandenen Risse ist unter diesen Randbedingungen eher nicht möglich. Somit ist unter diesen Randbedingungen auch nur eine partielle und eher nicht signifikante Rückbildung der Sekundärpermeabilität zu erwarten.

(b) Viskoplastisch duktile Gesteine

Gesteine mit (phänomenologisch) viskoplastisch- duktilem Materialverhalten deformieren sich bei Beanspruchungen oberhalb der Kriechgrenze ($\sigma_{VK} \neq 0$ MPa) auch unter spannungsumlagerungsbedingt abnehmenden Deviatorspannungen und führen damit zu konvergenten Gebirgsbewegungen und Spannungsumlagerungen mit einem kriechgrenzenabhängigen Aufbau eines Kontaktdruckes. Auch hier ist davon auszugehen, dass sich die Rissflächen gegeneinander versetzt haben und sich zunächst bei der Rissweitenverkleinerung je nach Rauigkeit der Rissoberfläche punktuell oder zonal Rissflächenbereiche berühren, in denen dann relativ große Spannungen übertragen werden. Dadurch erfolgt eine angesichts geringerer Festigkeiten und auch geringer Deformationsraten eher bruchfreie Plastifizierung dieser extremal beanspruchten Bereiche, die zu einer Reduzierung der Oberflächenrauigkeiten und weiter zu einer Erhöhung der Formtreue der gegenseitigen Rissflächen führt. Dabei ist es eher von sekundärer Bedeutung, ob die Plastifizierung beruht auf

- plastifizierungsfähigen Mineralkörnern wie bei Salzgesteinen (Ausbildung von Scherbändern, Subkornstrukturen) oder auf



- deformierbaren Hydrathüllen, von denen die Mineralkörner umgeben sind wie bei Tongesteinen mit einer allerdings je nach Mineralbestand und Wassergehalt sehr unterschiedlichen Plastifizierungsfähigkeit (Ton → Tonstein → Mergelstein/ Kalkmergelstein).

Bei Tongesteinen ist allerdings die kriechbedingte Kompression nicht der einzige Deformationsmechanismus, der zu einer Rissschließung führen kann. Hier ist bei entsprechendem Mineralbestand auch das Quellvermögen einiger Tonminerale zu bedenken. Allerdings wird der Quellvorgang erst dann induziert, wenn sich der Wassergehalt im Mineralkorngefüge erhöht, z.B. im Fall eines Lösungszutritts.

Von *Blümling (2001a)* werden zwei maßgebliche Rissschließungsprozesse im Tongestein wie folgt beschrieben:

(1) Mechanische Rissschließung durch die Ausbildung äußerer Stützdrücke an Bentonitwiderlagern:

Nach Feuchtigkeitszutritt in das Bentonitwiderlager werden Quelldrücke von bis zu mehreren MPa aktiviert, die tangentielle Risse in der um die Hohlraumkontur vorhandenen Auflockerungszone zudrücken können, da das Widerlager in der Strecke die erforderliche Stützung gewährleistet und der Quelldruck nicht zu einem weiteren Aufdrücken der Risse führt.

(2) Mechanische Rissschließung durch Quelldeformationen/ Quelldrücke im Gestein:

Das Quellen von Tonmineralen (z.B. Montmorillonit) durch Feuchtigkeitszunahme kann Risse senkrecht von den genetisch bedingten Schichtungsflächen schließen. Es entstehen Quelldrücke von etwa 1,5 MPa. Aber auch für diesen Mechanismus müssen die Risse bereits zugeedrückt worden sein, weil sonst die Volumenzunahme durch das Quellen keinen Gegendruck in den Rissen aufbaut, sondern eben nur hineinquillt, ohne damit eine Herabsetzung der Permeabilität zu bewirken. In der direkten Auflockerungszone um Hohlräume herum lässt sich dadurch eine Abnahme der Transmissivität um ca. zwei Größenordnungen auf $10^{-8} - 10^{-9}$ m/s messen.



Zusammenfassung mit Blick auf die Formulierung eines Bewertungsmaßstabes:

Grundsätzlich ergeben sich für unterschiedliche Gesteinsarten im Hinblick auf ihre Fähigkeit, Risse zu verschließen und damit eine Reduktion der Sekundärpermeabilität herbeizuführen, folgende wesentliche Sachverhalte:

- *Polykristalline und auch feinklastische Gesteine mit elastisch-sprödem Materialverhalten* und keinen bzw. vernachlässigbar geringen Kriecheigenschaften wie z. B. Granitgesteine, tendenziell aber auch Tonmergelsteine weisen grundsätzlich zwar die Fähigkeit auf, Risse bei einer Belastungsinversion rückzubilden, doch muss aufgrund der Mineralkorneigenschaften mit eher hoher Festigkeit davon ausgegangen werden, dass sich infolge Brückenbildung im Bereich der unebenen (rauen) und gegeneinander versetzten Rissflächen die Sekundärpermeabilität nicht in dem notwendigen Maß verringert. Außerdem kann die zur Risschließung erforderliche Belastungsinversion aufgrund der fehlenden Kriech- und Quelleigenschaften des Gesteins nicht bereits durch ein nur formschlüssig in die Strecke eingebautes Damm- oder Verschlussbauwerk erreicht werden.
- *Feinklastische Gesteine mit viskoplastisch- duktilem Materialverhalten* wie z. B. Tone und manche Tongesteine verfügen aufgrund ihrer viskoplastischen Deformationsfähigkeit über ein begrenztes Kriechvermögen, das zu einer entsprechenden Kriechkonvergenz führt. Phänomenologisch zeitabhängig erscheinende Deformationen können allerdings auch auf eine konturnahe Überbeanspruchung mit allmählichen Rissbildungen zurückzuführen sein (Abnahme der Spitzenfestigkeit auf die Restfestigkeit, pseudoplastische Zone, progressive Entfestigung). Unter diesen Bedingungen kann bei dem Einbau einer Querschnittsabdichtung in einen Grubenbau langfristig auch mit dem (passiven) Aufbau eines mäßigen Stützdrucks auf das umgebende Gebirge zu rechnen sein. Da weiterhin aufgrund des viskoplastischen Materialverhaltens und der aufgrund des Mineralkorngefüges eher geringen Gesteinsfestigkeit prinzipiell die Möglichkeit einer spannungsbedingten Einebnung von Rissflächenrauigkeiten und damit einer formschlüssigen Verschließung von Rissen besteht, liegt es nahe, von einer deutlichen Verringerung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung auszugehen. Dieser Mechanismus gilt allerdings nicht für Tonmergelsteine mit einer geschichteten Gefügeausbildung aufgrund ihres dann inhomogenen Gefügebauaufbaus und teilweise elastisch- spröden Materialverhaltens. Voraussetzung für diesen



Mechanismus ist vielmehr ein homogenes Gefüge mit geringen Carbonatanteilen und deutlich überwiegendem Tonmineralanteil in Gegenwart ausreichend verfügbarer Mengen an Porenwasser, da auch bei einem zu geringen Wassergehalt die Deformation eher weiterhin bruchbehaftet abläuft und die Rissflächen sich auch nicht für eine Risschließung in hinreichendem Maße formschlüssig- duktil deformieren.

Neben dieser mechanisch induzierten Risschließung kann auch das Quellvermögen von im Tongestein vorhandenen, entsprechend dem Mineralkornbestand und dem jeweiligen Umgebungsmilieu (z. B. pH-Wert des Grundwassers) in unterschiedlichem Maße quellfähigen Tonmineralen in erheblichem Maße dazu beitragen, dass sich bei entsprechendem Porenwasserangebot mit dem Quellen der Tonminerale in die Risse hinein dann nach ersten Risschließungen in diesen Rissbereichen Quelldruckspannungen von bis zu einigen MPa aufbauen, so dass die Risse sich auch formtreu verschließen und dann als Wegsamkeiten nicht mehr existent sind (Hydratisierung). Aufgrund des eher begrenzten Quellvermögens der Tongesteine ist allerdings zu erwarten, dass sich hinreichend große Quelldrücke nur dann aufbauen und wirksam die Risse als Wegsamkeiten verschließen können, wenn zuvor ein zumindest partielles Verschließen der Risse durch eine Belastungsinversion, d. h. durch einen passiven (oder auch aktiven) Stützdruckaufbau, stattgefunden hat. Voraussetzung hierzu sind Tongesteine mit überwiegendem Tonmineralanteil und ausreichender Wasserverfügbarkeit im Porenraum.

- *Polykristalline Gesteine mit viskoplastischem Materialverhalten und ausgeprägtem Kriechvermögen* wie z. B. (chloridische) Salzgesteine verfügen aufgrund ihrer viskosen Eigenschaften über die Fähigkeit, Risse zu verschließen, wenn sich eine Belastungsinversion einstellt und die Deviatorspannung abnimmt, während gleichzeitig die Minimalspannung ansteigt. Ein Risschluss ist bei hinreichender Beanspruchungsintensität auch formschlüssig möglich, weil lokale Spannungsspitzen im Bereich von Rissbrücken zu viskoplastischen Deformationen und zu Subkornbildungen führen, so dass sich die Rissoberflächen einander anpassen. Angehobene Temperatur und Feuchtigkeit fördern diesen Umkristallisationsprozess. Die Sekundärpermeabilität wird signifikant reduziert.

Die Formulierung von kriteriumsbezogenen Bewertungsmaßstäben kann beruhen



- qualitativ auf den prinzipiellen Fähigkeiten eines Gesteins zur Riss-schließung, d. h. auf den Eigenschaften, die das Gestein aufgrund seines Mineralkorngefüges selbst aufweist und
- quantitativ auf Untersuchungsergebnissen wie z. B. zu der Intensität der Rückbildung von Sekundärpermeabilitäten nach dem Aufbau eines realitätsnahen Kompaktionsdruckes.

2.5 Kriterium K5: Klüfte/ Risse im Gestein werden nach der Riss-schließung geomechanisch wirksam verheilt

Es ist leicht nachvollziehbar, dass ein Gestein insbesondere dann eine geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweist, wenn es die Eigenschaft aufweist, dass über den mechanischen Prozess der Riss-schließung hinaus auch eine geochemisch geprägte Riss-verheilung erfolgt, so dass unter Einwirkung von geotektonischen und technogenen Beanspruchungen längerfristig weder eine Sekundärpermeabilität vorhanden ist noch eine mechanisch wirksame Schädigung des Gesteinsgefüges erfolgt. Diese Eigenschaft zur Riss-verheilung ist insbesondere dann von Vorteil, wenn das Gestein aktiven geotektonischen Kräften unterliegt, die im Vergleich zu technogenen Belastungen allerdings zu erheblich geringeren Deformationsraten bei angehobenen isotropen Spannungen führen, so dass bei entsprechenden Materialeigenschaften unter diesen Randbedingungen im Lauf geologischer Zeiten auch große Deformationen möglich werden zumindest ohne dauernd wirksame Schädigung des Gesteinsgefüges.

Eine Riss-verheilung infolge von Sekundärmineralisationen bleibt außer Betracht, da es hier um die Verheilungsfähigkeit des Gesteins selbst gehen soll, nicht um grundsätzliche Möglichkeiten der Verheilung von Klüften oder Rissen. Aus dieser Einschätzung kann folgendes Kriterium abgeleitet werden:

Kriterium K5: Klüfte/ Risse im Gestein des einchlusswirksamen Gebirgsbereichs werden nach der Riss-schließung geomechanisch wirksam verheilt (→ Rückbildung der mechanischen Eigenschaften).

Das Kriterium *Verheilungsfähigkeit von Rissen* kann für die Anforderung *geringe Neigung zur Rissbildung* nicht nur aus laborativen Untersuchungen, sondern auch aus Feldbeobachtungen begründet und in Bewertungsmaßstäbe umgesetzt werden und hier nicht nur aus Erkennt-



nissen über geotektonisch gering beanspruchte Formationen, sondern gerade auch aus Erkenntnissen über Gebirgsformationen, die rezent rissfrei sind, in ihrer geologischen Vergangenheit aber geotektonisch (über)beansprucht worden sind und vielleicht zusätzlich auch noch große Deformationen erfahren haben.

Für die Verheilung eines Risses sind im wesentlichen zwei Voraussetzungen erforderlich:

- (1) Verschließen des Risses (durch eine geeignete mechanische Beanspruchung)
- (2) geochemische Beständigkeit des Gesteins, d.h. Einflüsse aus z.B. Feuchtigkeitsänderungen und/oder Temperaturänderung dürfen sich nicht negativ auf die Mineralstruktur und den intergranularen Zusammenhalt des Mineralkorngefüges auswirken.

Die Voraussetzungen zur Risschließung sind bereits in Abschnitt 2.4 behandelt worden.

Die Voraussetzungen zur geochemischen Stabilität beziehen sich darauf, dass das relevante Gestein unter Druck- und Temperatureinwirkung in Verbindung mit reaktiven Medien, auch Wasser, langfristig in seinem Gefüge stabil bleibt und nicht aufgrund von Veränderungen im Mineralgefüge seine anfänglichen (positiven) Eigenschaften verliert, z.B. *Darot und Gueguen (1986)*.

Rissverheilung ist im Gegensatz zur mechanischen Rissverschließung ein geochemischer Prozess, der in seinem Verlauf maßgeblich abhängt vom mechanischen Druck, von der Feuchte und von der Temperatur. Die Zeiträume, in denen eine Rissverheilung stattfindet, betragen Wochen bis Jahre, während die mechanisch geprägte Rissverschließung unmittelbar an die beanspruchungsbedingt induzierten Deformationsraten des Gesteins gebunden ist und zumindest bei elastischem Materialverhalten eher kurzfristig abläuft. Eine Rissverheilung kann allerdings nur eintreten, wenn der Prozess der Risschließung vorangegangen ist.

Hinzuweisen ist darauf, dass eine vollständige Verheilung nur dann möglich ist, wenn in den Riss eingedrungene Medien schneller hinausdiffundieren als sich der Riss schließt. Sonst erfolgt ein dauerhafter Einschluss der Fluide in die Gesteinsmatrix, wodurch einerseits eine weitere Verheilung verhindert wird, andererseits eine mechanische Schwachstelle erhalten bleibt.

Nachstehend sollen die grundsätzlichen Ausführungen auf Vertreter der Gesteinsarten polykristalline elastisch-spröde Gesteine (Granitgestein), feinklastische elastisch-spröde bis plas-



tisch-duktilen Gesteine (Tongesteine) und polykristalline viskoplastisch- duktile Gesteine (Salzgesteine) spezialisiert werden:

Untersuchungen an *Granit* als einem Vertreter der elastisch- spröden Gesteine zeigen, dass Granitgesteine verheilte Mikrorisse aufweisen können. Diese Verheilung erfolgte in Verbindung mit dem Durchströmen/ Durchsickern der geöffneten Trennflächen durch mineralisierte Wässer, wobei aufgrund hoher Drücke, angehobener Temperaturen und chemischer Reaktionsfähigkeit im Laufe geologisch relevanter Zeiträume die Risse kraft- und formschlüssig durch Sekundärmineralisation verheilt worden sind. Hierzu werden Temperaturen von 200 °C bis 400 °C angegeben, *Kowallis, Wang und Jang (1986)*. Zumindest Granit als Vertreter der elastisch- spröden Gesteine verfügt damit nicht über ein für die Verifizierung des Indikators unter Berücksichtigung der gestellten Aufgabe zu veranschlagendes Potential zur Riss-schließung durch Belastungsumkehr und damit verbunden zu einer Herabsetzung der Sekundärpermeabilität.

Der Verheilungsprozess in *Tongesteinen* ist ebenfalls nur auf Sekundärmineralisation zurückzuführen. Der Prozess des Quellens quellfähiger Tonminerale unter Feuchtigkeitszutritt ist der schon dargestellten Rissverschließung zuzuordnen. In Klüften in Tongesteinen können aus mineralisierten Wässern durch Reaktionen Minerale ausgefällt werden.

Bezüglich der Verheilung in Tongesteinen sind bisher wenige Versuche durchgeführt worden, so dass kaum Ergebnisse vorliegen, *Blümling (2001a)*.

In *Salzgestein* vollzieht sich nach der Rissverschließung am ehesten ein vollständiger Verheilungsprozess im Sinne einer form- und kraftschlüssigen Elimination von ehemaligen Rissen. Der Verheilungsprozess ist geprägt durch geochemische Rekristallisation, wobei unter mechanischem Druck, begünstigt durch angehobene Temperaturen, durch Umbildung der Mineralkörner ein neues Gefüge entsteht, *Hunsche und Schulze (1994)*.

Eine Verheilung mit geochemischer Rekristallisation oder Sekundärmineralisation ist immer auch gekennzeichnet durch eine mindestens teilweise Wiederherstellung der mechanischen Eigenschaften. Dieser Effekt geht über die mechanische Wirkung der Riss-schließung hinaus, bei der lediglich ein Formschluss erfolgt, aber kein Kraftschluss zwischen den Rissflächen.



Untersuchungen an verheilten Rissen in Granit haben gezeigt, dass diese häufig durch Sekundärminerale wie Calcit oder Quarz verschlossen wurden, *Sprunt und Nur (1979)*. Diese Beobachtung lässt den Rückschluss zu, dass die derartig verheilten Risse nicht die gleichen Festigkeiten erreichen wie das ungeschädigte Gesteinsgefüge.

Ähnlich verhält es sich bei Tongesteinen. Scherbänder mit durch Sekundärmineralisation verheilten Klüften sind nicht automatisch als potentielle Wegsamkeiten anzusehen, *Dewhurst, Westbrook, Clenell and Brown (1998)*. *Blümling (2001)* weist aber ausdrücklich darauf hin, dass eine Sekundärmineralisation nicht regelmäßig eintritt und auch keine dauerhafte Verheilung bedeutet muss.

Insgesamt kann nur bei Steinsalz und ähnlichen Salzgesteinen eine Reversibilität der mechanischen Eigenschaften sicher prognostiziert werden, zumal die Verheilung mit tatsächlicher Rekristallisation einhergeht und damit ein neuer Verbund im Korngefüge entsteht.

Zusammenfassung mit Blick auf die Formulierung eines Bewertungsmaßstabes:

Die Rissverheilung erfolgt durch geochemisch geprägte Rekristallisationsprozesse im Rissbereich mit oder ohne Zuführung von Fremdmineralen durch mineralisiertes Poren- oder Kluftwasser in Abhängigkeit von den vorliegenden Druck- und Temperaturbedingungen. Dabei werden in den ehemaligen Rissbereichen erneut atomare Bindungskräfte aufgebaut, die phänomenologisch zur Rückbildung der Kohäsion führen.

Für verschiedene Gesteinsarten sind unterschiedliche Verheilungsmechanismen bekannt:

- Elastisch- spröde polykristalline Gesteine mit keinen bzw. vernachlässigbar geringen Kriecheigenschaften (z. B. Granit) verheilen nur durch Sekundärmineralisation. Kluftverheilung durch Sekundärmineralisation findet nur in Anwesenheit eines Lösungsmittels, eines Konzentrations- und Temperaturgefälles sowie in Lösung befindlicher Ionen statt (Lösungsinhalte). Untersuchungen an dauerhaft durch Sekundärmineralisation verheilten Rissen im Granit ergaben, dass die Verheilung dort unter Bedingungen, wie sie in der Erdkruste druck- und temperaturbezogen in Tiefen ab 10 km vorkommen (Temperaturen von 350 °C - 400°C), stattgefunden haben muss. Verheilung ist auch unter gemäßigeren Bedingungen denkbar, aber nicht in nichtgeologischen Zeiträumen prognostizierbar. Unter-



suchungen und Versuche liefern keine Angaben über andere Verheilungsbedingungen und/ oder Rekristallisation im Gefüge.

- Gering plastisch- duktile feinklastische Gesteine (z. B. Tongesteine) verheilen nur durch Sekundärmineralisation, wobei dieser Prozess nicht regelmäßig auftreten muss und daher nicht mit der erforderlichen Sicherheit prognostizierbar ist. Der Prozess des Quellens wird nicht an dieser Stelle berücksichtigt, da dieser im engeren Sinne keine Verheilung, sondern eher eine Rissschließung darstellt.
- Viskoplastisch- duktile polykristalline Gesteine mit ausgeprägtem Kriechvermögen (z. B. chloridische Salzgesteine) verheilen nach erfolgter mechanischer Rissschließung durch geochemisch geprägte Rekristallisationsvorgänge unter Einfluss von Temperatur, Feuchtigkeit (Salzlösung) und Druck mit Mineralkornneubildung im Rissbereich. Einen bergbautechnisch bekannten Extremfall und zugleich in situ- Beleg stellt die Rekompaktion von Salzgrus (Salzhauwerk) dar, die unter den Randbedingungen Zeit, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit bis hin zur Ausbildung eines Festgesteins mit nahezu natürlichen Eigenschaften erfolgen kann.

In die Formulierung von kriterienbezogenen Bewertungsmaßstäben können einbezogen werden:

- qualitativ die Existenz der Mechanismen Rekristallisation und Sekundärmineralisierung in Verbindung mit dem grundsätzlichen Vorhandensein der Bedingungen für die Aktivierung und die Umsetzung der jeweiligen gesteinsabhängigen Verheilungsprozesse und
- quantitativ der Grad der Rückbildung der Kohäsion unter den jeweiligen in situ- Bedingungen (z. B. Druck, Temperatur, Feuchtigkeit).



3 Formulierung von kriterienbezogenen Bewertungsmaßstäben

Entsprechend Abschnitt 2 kann die Anforderung *geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* durch zwei Indikatoren und daraus abgeleitet verschiedenen Kriterien konkretisiert werden, die geomechanische, geohydraulische und geotektonische sowie geowissenschaftliche, bergbauliche und geotechnische Sachverhalte beschreiben. Dabei zeigen die Kriterien unterschiedliche Charaktere: teilweise beruhen sie auf nur qualitativ erhebbaren Sachverhalten, teilweise sind die Sachverhalte auch quantitativ zu fassen. Die Operationalisierung der Indikatoren erfolgt in der vorgegebenen Systematik über die Kriterien, die aus den Sachverhalten abzuleiten sind. Dazu erscheint es sinnvoll, Kriterien zunächst grundsätzlich zu formulieren und bei Bedarf dann gesteinsabhängig zu spezialisieren. Weiterhin ist zu beachten, dass die Nichterfüllung von einzelnen Kriterien nicht unbedingt automatisch dazu führt, dass die Erfüllung der Anforderung selbst nicht positiv bewertet werden kann.

Grundsätzlich wird ein ordinaler, überwiegend dreistufiger Bewertungsmaßstab gewählt. Die einzelnen Stufen sind gegeneinander abgegrenzt durch die Bereiche:

- Kriterium erfüllt → (ja)
- Kriterium nur teilweise erfüllt → (bed = bedingt)
- Kriterium nicht erfüllt → (nein)

3.1 Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K1: Gebirgspermeabilität gleich Gesteinspermeabilität

K1: Die repräsentative Gebirgspermeabilität sollte gleich der repräsentativen Gesteinspermeabilität sein.

Das Kriterium K1 kann mit folgendem zahlenmäßig formuliertem Bewertungsmaßstab operationalisiert werden:

$$K_{\text{Gebirge}} \leq 10 \cdot K_{\text{Gestein}} \quad (3.1)$$

Unabhängig davon, dass die Permeabilität des Gebirges mit $K < 10^{-17} \text{ m}^2$ auf einem hinreichend geringen Niveau liegen muss entsprechend der Anforderung *keine oder nur langsame Grundwasserbewegung*, ist es als Anzeichen für eine geringe Neigung zur Rissbildung anzu-



sehen, wenn sich Gebirgspermeabilität und laborativ ermittelte Gesteinspermeabilität nicht signifikant voneinander unterscheiden, da dieser Befund auf ein geohydraulisch nicht signifikantes Trennflächengefüge hinweist. Als in der gleichen Größenordnung liegend werden die Permeabilitäten dann eingeschätzt, wenn sich die Gebirgspermeabilität um nicht mehr als eine Zehnerpotenz von der Gesteinspermeabilität unterscheidet. Die Gesteinspermeabilität kann erfahrungsgemäß einerseits auch aufgrund bohrkernentnahmebedingter Gefügeschädigungen größer sein als die Gebirgspermeabilität unter Gebirgsspannungen, andererseits kann aber auch maßstabsbedingt (Handstück/ Gebirge) aufgrund im Handstück nicht hinreichend repräsentativ erfasster Wegsamkeiten die Gebirgspermeabilität größer sein als die Gesteinspermeabilität. In der Größenordnung ergeben sich für die hier relevanten Gesteinstypen folgende Gesteinspermeabilitäten:

- *Granit*: $K = 10^{-19} - 10^{-21} \text{ m}^2$ nach *Souley and Homand (2001)*
- *Tongesteine*: $K = 10^{-20} - 10^{-22} \text{ m}^2$ nach *Boutéca and Sarda (1999)*
- *Steinsalz*: $K = 10^{-22}$ nach *Langer (1995)*

Erfahrungsgemäß können diesen Gesteinspermeabilitäten nachstehende Befunde zu den zugehörigen Gebirgspermeabilitäten zugeordnet werden:

Granitische Gebirgsformationen weisen im Grundsatz ein im günstigsten Fall sehr weitständiges Trennflächengefüge auf. In der Tendenz ist davon auszugehen, dass sich Gebirgs- und Gesteinspermeabilität um mehr als eine Dekade unterscheiden. Gebirgspermeabilitäten aus Felduntersuchungen sind zu finden bei *Appel und Habler (2001)*.

Gebirgsformationen aus Tongesteinen sind nach *Appel und Habler (2001)* durch eine große Bandbreite in der Gebirgspermeabilität gekennzeichnet. Wesentliche Parameter sind dabei die Tiefe und die Art des Tongesteins. Tendenziell ist eine Abnahme der Permeabilität mit zunehmender Tiefe festzustellen (→ geringere Rissöffnung bzw. Rissbildung bei ansteigendem Gebirgsdruck). Weiterhin ist tendenziell eine Abnahme der Permeabilität zu verzeichnen, wenn das Tongestein den Tonsteinen mit geringen Kalkgehalten und nicht den Tonmergelsteinen zuzuordnen ist. Für Tongesteine werden Gebirgspermeabilitäten von $K = 10^{-20} - 10^{-22} \text{ m}^2$ angegeben.



Salzgesteinsformationen schließlich gelten erfahrungsgemäß als flüssigkeits- und gasdicht. Gemessene Permeabilitäten werden außerhalb konturnaher Auflockerungszonen zu $K < 10^{-22} \text{ m}^2$ angegeben, z.B. *Häfner (2001)*.

Für eine Bewertung wird eine dreiteilige skalare Bewertungsskala vorgeschlagen:

- Gebirgspermeabilität entspricht Gesteinspermeabilität (im geohydraulischen Sinn) mit
 $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} \leq 10 \quad \rightarrow \quad (\text{ja})$
- Gebirgspermeabilität ist moderat größer als Gesteinspermeabilität mit
 $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} \leq 100 \quad \rightarrow \quad (\text{bed})$
- Gebirgspermeabilität ist drastisch größer als Gesteinspermeabilität mit
 $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} > 100 \quad \rightarrow \quad (\text{nein})$

Gesteinsbezogene exemplarische Bewertung:

- Granitgesteine:
 - In der Tendenz $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} > 100 \quad \rightarrow \quad (\text{nein})$
 - Ausnahmsweise $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} < 10 \quad \rightarrow \quad (\text{ja})$
- Tongesteine:
 - In der Tendenz $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} < 100 \quad \rightarrow \quad (\text{bed})$
 - Bei geringem Kalkgehalt $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} < 10 \quad \rightarrow \quad (\text{ja})$
- Salzgesteine:
 - In der Tendenz $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} < 10 \quad \rightarrow \quad (\text{ja})$

Für eine zuverlässige Festlegung sind die Daten im Rahmen der Übertageerkundung/ untertägigen Erkundung standortbezogen zu ermitteln.



3.2 Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K2: Barrierenwirkung des Gesteins bekannt auch im Größenbereich der Gebirgsformation und bei geogener Vorbeanspruchung

K2: Die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener und auch teilweise anthropogener Beanspruchung) sollte aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar sein.

Das Kriterium K2 soll mit folgendem Bewertungsmaßstab operationalisiert werden:

Das Kriterium bezieht sich auf die erfahrungsmäßig nachgewiesene Wirksamkeit einer Gebirgsformation als sogenannte geologische Barriere mit einer nur geringen Durchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, wobei einerseits eine Mindestmächtigkeit vorausgesetzt werden muss, andererseits die geohydraulisch abdichtende Wirksamkeit nachgewiesen sein muss durch Erfahrungen zum Beispiel aus vorhandenen Bergwerken oder durch geowissenschaftliche Beobachtungen.

Das grundsätzlich formulierte Kriterium kann damit in Unterkriterien aufgelöst werden, mit deren Hilfe eine qualitative Beurteilung von über die Gesteinsart charakterisierten Gebirgsformationen hinsichtlich der Zielgröße *Barrierenwirkung bekannt* erfolgen kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass Gebirgsformationen, die in situ erfahrungsgemäß eine abdichtende Wirkung gegenüber einer Fluidmigration aufweisen und in der geologischen Vergangenheit auch noch einer geotektonischen Beanspruchung ausgesetzt waren, die zu einer heute gestörten Lagerung geführt hat, in besonderer Weise dokumentieren, dass sie in nur geringem Maße zur Bildung von Wegsamkeiten neigen. Vor diesem Hintergrund ist entsprechenden Gebirgsformationen in gestörter Lagerung eine noch größere Aussagekraft beizumessen als Gebirgsformationen in ungestörter Lagerung. Selbstverständlich können diesbezügliche Erfahrungen faziesbezogen auch von Standort zu Standort übertragen werden (z.B. Steinsalz im Salzstock mit halokinetischer Beanspruchung = gestörte Lagerung → Steinsalz in geschichteter Lagerung (Schichtensalz) ohne halokinetische Beanspruchung = ungestörte Lagerung).

Bei den Unterkriterien ist danach zu unterscheiden, ob

- sich das Unterkriterium unmittelbar auf eine Gebirgsformation mit entsprechenden Eigenschaften bezieht oder ob



- ein geologischer Sachverhalt angesprochen wird, der auf die Existenz einer geologischen Barriere im Umfeld schließen lässt, so dass mit dem Unterkriterium dann nur mittelbar die geologische Barriere identifiziert wird.

Als Unterkriterien sind identifiziert worden:

- wasserlösliches Gestein mit rezenter Existenz (→ impermeables Gefüge und begrenzte/ keine Subrosion an der Oberfläche der Formation, aber auch abdeckende/ abdichtende Schichten, kein Grundwasser),
- fossile Fluideinschlüsse (→ impermeables Gefüge),
- unterlagernde wasserlösliche Gesteine (→ abdichtende hydrogeologische Schutzschicht im Hangenden),
- unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe (→ abdichtende Formation im Hangenden),
- Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken (→ nachgewiesene Funktionstüchtigkeit als geologische Barriere auch unter bergbaulichen Einwirkungen),
- Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung (geogene oder bergbauinduzierte Seismizität) (→ nachgewiesene Funktionstüchtigkeit auch bei momentanen Beanspruchungen/ Deformationen),
- Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Lagerung von flüssigen und gasförmigen Medien (→ undurchlässiges Gebirge auch nach technischen Eingriff und bei zyklisch wechselnden Beanspruchungen).

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die relevante Gebirgseigenschaft der Impermeabilität (geologische Dichtheit) unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen wirksam wird, insbesondere den Gebirgsdruckspannungen.

Die einzelnen Unterkriterien sind als Hilfsmittel zur Identifizierung von Barrierengesteinen zu verstehen. Selbstverständlich können jeweils nur einzelne Unterkriterien zutreffen.

Exemplarische dreiteilige skalare Bewertung:



- Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand mehrerer Unterkriterien oder auch nur eines Unterkriteriums als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert auch unter geogener/ technogener Beanspruchung → (ja)
- Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp ist nicht unmittelbar/ mittelbar anhand eines Unterkriteriums als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren → (bed)
- Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines Unterkriteriums als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert → (nein)

Ergänzende Hinweise:

Infolge eines im Grundsatz vorliegenden und geotektonisch bedingten Trennflächengefüges, welches aus Abkühlungsprozessen bei der Entstehung und/ oder aus nachfolgenden großräumigen Hebungen und Senkungen resultiert, scheinen Granitgesteine eo ipso keine hinreichenden Eigenschaften als geologische Barriere im engeren Sinn aufzuweisen. Hinreichend gering durchlässige Gebirgsbereiche (Blöcke) innerhalb großräumiger Gebirgsformationen sind kartographisch möglicherweise nicht oder nur mit relativ großer Unsicherheit behaftet identifizierbar. Ausnahme sind die aus Kanada publizierten Verhältnisse im Bereich des Untertagebaus, Souley et al. (2001).

Tongesteine, insbesondere Tonsteine mit hohem Tonmineralanteil im Gefüge und weitgehend homogenen Aufbau und hier mehr noch plastische Tone werden im Deponiebau als künstliche oder natürliche Barriere gegen die Migration von aus den abgelagerten Abfällen durch Sickerwässer freigesetzten Schadstoffen herangezogen und haben auf diesem Gebiet ihre grundsätzliche Eignung als Barrierengestein unter Beweis gestellt. Allerdings zeigen sich auch hier die hydraulischen Grenzen dieser Gesteine an oder in der Nähe der Tagesoberfläche (z.B. rezente Verwitterungseinflüsse, geringe Gebirgsspannungen, hebungsbedingte Entfestigung, Auflockerung, Fazieswechsel).

Weiterhin sind Tongesteine als abdichtende Gebirgsschichten bekannt aus dem Bereich der Erdöl-/ Erdgasindustrie, aus dem Steinkohlebergbau im Karbongebirge und aus dem Salzbergbau als das Salzgestein gegenüber dem Grundwasser abdichtenden Schichten. Allerdings



ist bei der Übertragung von Erfahrungen auf nicht geologisch unmittelbar aufgeschlossene Gebiete auch zu beachten, dass Tongesteinformationen inhomogen aufgebaut sein können (z.B. eingelagerte Kalksteinbänke, sandige Zwischenlagen).

Salinargesteine scheinen aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit auf den ersten Blick nicht als Barrieregestein geeignet. Ihre jahrmillionenlange Existenz in Form von Salzstöcken (steile Lagerung) oder in Form von Schichtensalz (flache Lagerung) beweist jedoch ihre Eignung als geologische Barriere für sich allein oder in Verbindung mit gering durchlässigen bzw. impermeablen nichtsalinaren Nebengesteinen im Hangenden und Liegenden. Aufgrund des impermeablen Gesteinsgefüge dringen anstehende wässrige Lösungen im Grundsatz auch bei direktem Kontakt Salzlösung – Gestein nicht in die Gebirgsformationen ein (Randbedingung: Gebirgsdruck größer Salzlösungsdruck).

3.3 Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K3: Das Gestein sollte unter in situ- Bedingungen geogen eine plastisch- viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen

K3: Das Gestein im einschlusswirksamen Gebirgsbereich weist unter in situ- Bedingungen eine plastisch- viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz auf.

Das Kriterium K3 wird durch folgende Bewertungsmaßstäbe operationalisiert:

In das Kriterium sind zwei Aspekte integriert, nämlich die vorliegenden Beanspruchungsbedingungen und das unter diesen Bedingungen zu erwartende Materialverhalten.

Grundsätzlich sind die Beanspruchungsbedingungen (primäre und sekundäre Gebirgsspannungen, Gebirgstemperatur im Lauf der Zeit) vorab und standortunabhängig nicht detailliert quantifizierbar, sondern nur in der Tendenz eingrenzbar. Dabei könnte zur Eingrenzung der Tendenz folgende Argumentation gewählt werden:

- (a) *Gebirgstemperatur*: Die sekundäre Gebirgstemperatur ist durch die Auslegung des Endlagers beeinflussbar. Es wird davon ausgegangen, dass die Gebirgstemperaturen nicht größer als 90 – 100°C werden. Veränderliche Gebirgstemperaturen führen grundsätzlich zu veränderten Materialeigenschaften sowie zu Zusatzspannungen, die als thermisch induzierte Spannungen bezeichnet werden (Thermospannungen). Grundsätzlich ist be-



kannt: Polykristalline Gesteine zeigen bei angehobener Temperatur eine zunehmende Duktilität, so dass sich hier die angehobene Gebirgstemperatur eher positiv auswirkt. Feinklastische Gesteine zeigen bei angehobener Temperatur eine Veränderung des Wassergehaltes. Hier könnte eine thermisch bedingte Reduzierung des Wassergehaltes (= Austrocknung) mit der Ausbildung von Schrumpfrissen verbunden sein.

- (b) *Gebirgsbeanspruchung*: Die Gebirgsbeanspruchung ist zu unterteilen in geogene und technogene Anteile. Eine Quantifizierung ist unter Annahmen zum primären Gebirgsspannungszustand als Ergebnis der bisherigen geotektonischen Entwicklung, zur Geometrie und Teufenlage des Endlagerbergwerks, zu den Materialeigenschaften des Gebirges, zu den thermischen Einwirkungen aus den abgelagerten Abfällen und zu der zukünftigen geotektonischen Entwicklung des Standortbereiches (in Verbindung mit den geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien) grundsätzlich möglich, aber nicht standortunabhängig, es sei denn, es erfolgt eine Beschränkung auf eine repräsentative geomechanische Situation, *Lux et al. (2002a)*.

In diesem Rahmen soll daher nicht die Beanspruchung, sondern vielmehr die Beanspruchbarkeit des Gesteins/ Gebirges betrachtet werden in Verbindung mit dem Gesichtspunkt, dass die vorhandene Gebirgstragfähigkeit so weit möglich und notwendig planerisch genutzt wird (genutzt werden kann).

Damit wird das Kriterium in seiner Anwendung zurückgeführt auf die materialbezogene Seite. Als vorteilhaft bewertet werden damit mit diesem Kriterium Gesteine, die eine möglichst ausgeprägte Duktilität aufweisen ohne zugleich dilatant zu reagieren.

Maß für die Duktilität ist das in Untersuchungen an Gesteinsprüfkörpern ermittelte plastisch-viskose Deformationsvermögen, während die Dilatanz als Gefügefestigkeit gemessen werden kann über das relative Beanspruchungsniveau der Dilatanzgrenze im Vergleich zur Bruchfestigkeit und den Dilatanzwinkel. Weiterhin ist festzuhalten, dass Duktilität auf Eigenschaften des Gesteinsgefüges beruht, insbesondere der Mineralkornzusammensetzung, so dass qualitativ auch die Gesteinsbezeichnung selbst, die als ein Maß für die Gefügezusammensetzung angesehen werden kann, als Unterkriterium herangezogen werden kann. Damit ergibt sich bei Auflösung des Kriteriums K3 in Unterkriterien:



K3c: Der Dilatanzwinkel ist gering, gemessen für $\min\sigma = 2 \text{ MPa}$ (nicht unmittelbarer Streckenkonturbereich). Der Dilatanzwinkel wird gemessen in der Form:

$$\psi = \arcsin(\varepsilon_{\text{vol}} / (\varepsilon_{\text{vol}} - 2\varepsilon_1)) \quad (3.3)$$

für triaxiale Kompressionsversuche (TC) bzw. triaxiale Extensionsversuche (TE)

mit

ε_{vol} Volumendehnung, -

ε_1 maximale Hauptverzerrung, - ($\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$)

Exemplarische skalare Bewertungsskala (Vor- bzw. Nachbruchbereich):

- Geringer Dilatanzwinkel: $0 \leq \psi \leq 5^\circ$ → (ja)
- Mittlerer Dilatanzwinkel: $5^\circ < \psi \leq 10^\circ$ → (bed)
- Großer Dilatanzwinkel: $10^\circ < \psi$ → (nein)

Hinweise:

- (1) Ein Gestein, das planmäßig auch bei ‚nur‘ linear- elastischem Materialverhalten unterhalb seiner Dilatanzfestigkeit beansprucht wird, neigt ebenso wenig zur Sekundärrissbildung wie ein Gestein mit ausgeprägt plastisch- viskosem Materialverhalten ohne Dilatanz, solange die Kriechbruchdeformation ε_{vf} nicht erreicht wird.
- (2) Das Unterkriterium K3a ist für den Verfahrensschritt 2 anzuwenden (Schreibtischkenntnisse), während die Unterkriterien K3b und K3c dann in die Verfahrensschritte 4 bzw. 5 einzubringen sind (laborative Untersuchungen).
- (3) Nach längerer Diskussion ist die unter Abschnitt 2.3 noch aufgeführte und zuvor sogar als eigenständiges Kriterium aufgeführte absolute Dilatanzfestigkeit nicht in den Kriterienkatalog dieser Anforderung aufgenommen worden. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass die Dilatanzfestigkeit bereits in die Anforderung *günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen* eingearbeitet worden ist dadurch, dass eine Überschreitung nur begrenzt zugelassen ist und dieses Merkmal der Überschreitung rechnerisch



für die verschiedenen Gesteinsarten bearbeitet worden ist (Relation Beanspruchung-Beanspruchbarkeit). Auf diese Weise wird eine explizite Mehrfachberücksichtigung eines Kriteriums in verschiedenen Anforderungen vermieden.

3.4 Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K4: Klüfte/ Risse werden bei Beanspruchungsinversion geohydraulisch wirksam verschlossen

Kriterium K4: Klüfte/ Risse im Gestein werden bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen (→ Rückbildung der Sekundärpermeabilität), eventuell auch Reduzierung der Primärpermeabilität).

Das Kriterium K4 wird über folgende Bewertungsmaßstäbe operationalisiert:

In das Kriterium sind zwei Sachverhalte implementiert: einerseits muss grundsätzlich für den relevanten Gebirgsbereich eine Situation beanspruchungsbezogen vorliegen, bei der die minimale bzw. isotrope Gebirgsspannung zunimmt und bei der die deviatorische Beanspruchung abnimmt, z.B. realisiert durch den aktiven oder passiven Aufbau von Kontaktldrücken in abgedichteten oder versetzten Grubenbauen zwischen Querschnittsabdichtung oder Versatz und Gebirge oder durch aktive geogene Gebirgsspannungen. Andererseits muss diese inverse Beanspruchung auch noch so groß sein, dass sich die Öffnungsweite von Klüften/ Rissen soweit verringert, dass die durchflusswirksamen Wegsamkeiten nachhaltig verringert und im günstigsten Fall eliminiert werden.

Es erscheint wenig zweckmäßig, hier ohne endlagerbezogene Daten die beanspruchungsbezogenen Randbedingungen zu diskutieren und in die Bewertung einzufügen. Damit werden z.B. folgende Aspekte vernachlässigt:

- Ist eine inverse Beanspruchung hinreichend groß, um die Klüfte/ Risse geohydraulisch wirksam zu verschließen?
- In welcher Zeit (Jahre bis Jahrtausende) baut sich die inverse Beanspruchung in hinreichender Größe auf (→ Abnahme der Kriechkonvergenzrate mit abnehmender Deviatorspannung)?



- Ist die inverse Beanspruchung in hinreichendem Maße begrenzt, so dass keine neuen Wegsamkeiten induziert werden (z.B. zu großer Kontaktdruck oder zu große Steifigkeit der Querschnittsabdichtung)?

Es erscheint allerdings verständlich, dass die Beantwortung dieser Fragen bzw. die Bewertung dieser Aspekte Angaben erfordert, die erst im Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können. Somit soll hier vielmehr eine Beschränkung der Betrachtung auf grundsätzliche und im Grundsatz auch bekannte gesteinsbezogene Merkmale/ Eigenschaften erfolgen. Dabei ergibt sich auch hier eine zweistufige Bewertung mit einer zunächst qualitativen Einschätzung des Gesteinsverhaltens durch Übertragung bestehender Erfahrungen mit dem Gesteinstyp als Übertragungsparameter in Verfahrenschritt 2 und einer nachfolgend quantitativ belegten Bewertung in Verfahrenschritt 4 bzw. 5. Diese quantitativ belegte Bewertung kann durch geeignete laborative Untersuchungen dann erarbeitet werden, wenn im Rahmen der Übertageerkundung und später der Untertageerkundung Bohrkernmaterial aus den relevanten Gebirgsbereichen vorhanden ist. Folgende tendenzielle Gesteinseigenschaften sind zu verzeichnen:

(a) *Qualitativ orientierte Bewertung:*

Für die qualitative, auf vorhandener Erfahrung beruhende und gesteinsfaziesbezogene Bewertung wird als Bewertungsmaßstab vorgeschlagen:

K4a: Das Gestein neigt aufgrund duktiler Materialeigenschaften zur Rissschließung.

Exemplarisch wird eine dreiteilige skalare Bewertungsskala vorgeschlagen:

- Die Rissschließung erfolgt erfahrungsgemäß aufgrund eines duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig (weitgehende Rückbildung der Sekundärpermeabilität) → (ja)
- Die Rissschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, z.B. Quelldeformationen → (bed)
- Die Rissschließung erfolgt nur in beschränktem Maße oder nicht (z.B. sprödes Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung) → (nein)

Exemplarische Bewertung:



Polykristalline nicht kriechfähige Gesteine (z.B. *Granit*) neigen nicht oder nur wenig zur Risschließung, feinklastische Gesteine (z.B. *Tongesteine* und *Tone*) mit elastisch- sprödem bis elastoplastisch– duktilem Materialverhalten neigen begrenzt bis ausgeprägt zur Risschließung und polykristalline kriechfähige Gesteine (*Salinargesteine*) neigen ausgeprägt zur Risschließung.

(b) *Quantitativ orientierte Bewertung:*

Für die quantitative, auf laborativen Untersuchungen beruhende Bewertung wird folgende Bewertungsgröße formuliert:

K4b: Das Gestein weist bei Belastungsinversion eine Rückbildung der Sekundärpermeabilität auf:

$$K^S \rightarrow K^P \quad \text{für} \quad \min \sigma^{\uparrow} / \sigma_v^{\downarrow} \quad (3.4)$$

mit K^S = Sekundärpermeabilität

K^P = Primärpermeabilität

Zur Bewertung wird eine dreiteilige skalare Bewertungsskala vorgeschlagen:

- Die Sekundärpermeabilität des Gesteins ist bei Beanspruchungsinversion $\min \sigma^{\uparrow} / \sigma_v^{\downarrow}$ vollständig reversibel: $K^S < 10 \cdot K^P$ → (ja)
- Die Sekundärpermeabilität des Gesteins ist bei Beanspruchungsinversion $\min \sigma^{\uparrow} / \sigma_v^{\downarrow}$ weitgehend reversibel: $K^S < 100 \cdot K^P$ → (bed)
- Die Sekundärpermeabilität des Gesteins ist bei Beanspruchungsinversion $\min \sigma^{\uparrow} / \sigma_v^{\downarrow}$ nur unzureichend reversibel: $K^S \geq 100 \cdot K^P$ → (nein)

Aus dieser Bewertungsskala für Subkriterium K4b folgt, dass die geohydraulische Wirksamkeit der Risschließung als der zentrale Aspekt angesehen wird.



Gewährleistet werden muss allerdings, dass in situ tatsächlich auch die Bedingungen vorliegen, die zu einer Rissschließung führen. Hierzu sind angesichts der zentralen Bedeutung dieses Kriteriums entsprechende Berechnungen und Feldbelege beizubringen.

3.5 Bewertungsmaßstäbe zu Kriterium K5: Klüfte/ Risse im Gestein werden nach der Rissschließung geomechanisch wirksam verheilt

K5: Klüfte/ Risse im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden nach der Rissschließung geomechanisch wirksam verheilt (→ Rückbildung der mechanischen Eigenschaften)

Das Kriterium K5 wird durch folgende Bewertungsmaßstäbe operationalisiert:

Eine geomechanisch wirksame Verheilung ist grundsätzlich möglich

- (1) durch kompaktiv bedingte Rissschließung und die dann folgende Verwachsung der Rissflächen mit der Aktivierung atomarer Bindungskräfte (z.B. Rekristallisation, diagenetische Verfestigung → erneute Ausbildung einer Kohäsion),
- (2) durch die Ausfällung von Präcipitaten aus wässrigen Lösungen und die allmähliche Verfüllung des Risses durch die sich bildenden Sekundärminerale, die sowohl untereinander wie mit der Rissoberfläche verwachsen (Sekundärmineralisation).

Voraussetzung für den Verheilungsmechanismus (2) sind allerdings ein entsprechendes geochemisches Milieu sowie die Durchsickerung des Gebirges mit übersättigten wässrigen Lösungen. Dieser Durchsickerungsprozess führt allerdings gerade die Wässer durch das Gebirge, die abfallbezogen als Löse- und Transportmittel auszusehen sind. Der Verheilungsmechanismus (2) ist damit

- bei rezent offenen Rissen hier nicht mehr relevant bzw.
- bei bereits geohydraulisch wirksamen geschlossenen Rissen nicht möglich, so dass sich die weitere Berücksichtigung auf den Verheilungsmechanismus (1) konzentrieren kann.



Grundsätzlich von Bedeutung für die Verheilung ist die geochemische Stabilität der Gesteine. Bei Einwirkung von Wasser (Feuchtigkeit), Druck und Temperatur (sowie radioaktive Strahlung) muss das Mineralkorngefüge stabil bleiben, d.h. die Umgebungsbedingungen dürfen keine negativen Auswirkungen auf das Gefüge und den Kristallaufbau haben, wie z.B. Auflösung oder Zersetzung von Mineralen oder signifikante Herabsetzung des Rissbildungswiderstandes.

Die geomechanisch wirksame Verheilung von Rissen nach dem Mechanismus (1) setzt voraus, dass die Rissflächen nicht nur zusammengepresst werden, sondern dass die Rissoberflächen miteinander verwachsen und geochemische Bindungskräfte wirksam werden und die Risse nicht mehr als geomechanisch relevante Schwächezonen signifikant hervortreten. Mechanisch gesehen muss bei einer Scherbeanspruchung in der Rissfläche nicht nur eine Reibungsfestigkeit, sondern auch eine sich der Qualität des ungeschädigten Gesteins annähernde Haftfestigkeit (Kohäsion) vorhanden sein. Eine diesen Sachverhalt vertiefende Frage könnte dahingehend gestellt werden, ob es notwendig ist, dass die Haftfestigkeit das Niveau der Gesteinsfestigkeit erreicht.

Exemplarische zweiteilige Bewertungsskala:

- Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit Mineralkornneubildung im Rissflächenbereich → (ja)
- Rissverheilung nur durch Sekundärmineralisation (nein) → (nein)

Exemplarische gesteinstypbezogene Bewertung:

- *Granitgesteine* sind unter hier relevanten Bedingungen nur verheilungsfähig durch Sekundärmineralisation bei Lösungszutritt (Ausfällungsreaktion) → (nein)
- *Tongesteine* mit eher sprödebruchartigem Materialverhalten bei entsprechenden Kalk- oder Quarzgehalten und geringem Wassergehalt sind wie Granitgesteine einzustufen → (nein)
- *Tongesteine* mit eher elastoplastisch- duktilem Verhalten sind verheilungsfähig über die Wirkung atomarer Bindungskräfte zwischen den Mineralkornoberflächen (elektrostatische



Oberflächenkräfte). Dabei werden die Bindungskräfte um so stärker, je geringer kompaktionsbedingt die Partikelabstände werden. → (ja)

- *Salinargesteine* mit viskoplastisch- duktilem Materialverhalten neigen unter (p, T, w)-Bedingungen zu einer Sekundärkristallisation, wobei die ehemaligen Rissflächen in der neuen Kristallkornstruktur weitgehend eliminiert werden. → (ja)

Ergänzende Hinweise:

Granitgesteine verheilen nur durch Sekundärmineralisation in eher geologischen Zeiträumen und unter hohen Drücken bei Zutritt von mineralisierten Wässern aus z.B. durchlässigen Deckgebirgsschichten, *Kowallis, Jang, Wang (1986)*. Der einer Verheilung vorangehende Prozess der Risschließung ist unter Umständen auch erst nach Zeiträumen in geologischer Größenordnung (tausende von Jahren) abgeschlossen und tritt daher eher gleichzeitig mit der Sekundärmineralisierung ein.

Auch in *Tongesteinen* ist eine Verheilung nur durch Sekundärmineralisation zu erwarten, da die Mechanismen der Risschließung und des Quellens keinen Verheilungsprozess darstellen, sondern nur ein Verschließen von Rissen. *Blümling (2001a)* beschreibt diesen Prozess als langfristig nicht zuverlässig, da möglicherweise in den Rissen wasserlösliche Sekundärminerale ausgefällt werden können.

In *Salinargesteinen* dominiert als einziger der hier relevanten Gesteinsgruppen die Verheilung in Form geochemischer Rekrystallisation und führt damit infolge der auch kraftschlüssigen Rissrekonstitution zu einer Reduktion des Damage- Parameters D. Voraussetzung für eine Verheilung sind einerseits eine begrenzte Vorschädigung und andererseits eine vorlaufende Risschließung, die als Mechanismus 1 des zweistufigen Verheilungsprozesses vorangehen muss. Im Laborversuch erfolgt die Risschließung bei der dort vorliegenden Beanspruchungssituation mit einer nahezu momentanen Aufbringung des Verheilungsspannungszustandes im Zeitrahmen von wenigen Stunden, während der Prozess der Rissverheilung über Tage bzw. Wochen andauert. Bild 3.1 zeigt dazu einen Versuch, *Chan (1998)*. Entsprechende erste Berechnungen wurden von *Hou (2002)* mit einem neu entwickelten Stoffmodell für diesen Mechanismus durchgeführt. Ihre Ergebnisse zeigt Bild 3.2.

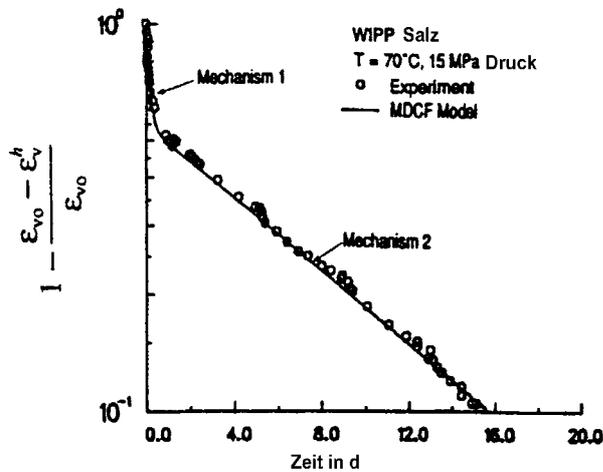


Bild 3.1: Experimentell ermittelter Verlauf der Verheilung nach Chan, (1998)

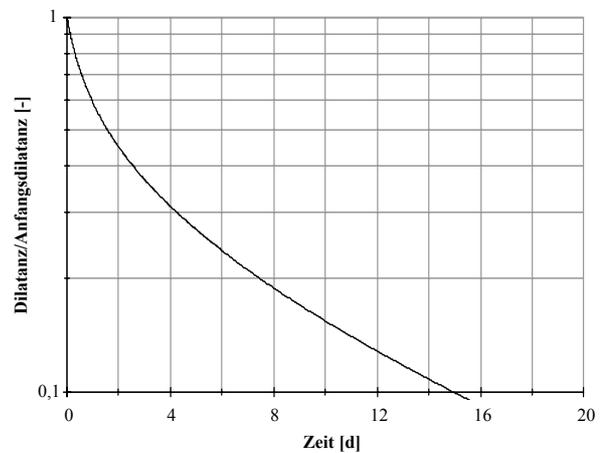


Bild 3.2: Berechneter Verheilungsverlauf mit einem Verheilungs-Stoffmodell nach Hou, (2002)

Mit der Zielgröße einer geomechanisch wirksamen und damit notwendig kraftschlüssigen Verheilung können nur Salinargesteine dieses Kriterium erfüllen. Von einer signifikant schwächeren Konstitution des durch Sekundärmineralisation verheilten Gefüges im Vergleich zum intakten Gefüge ist nicht mehr auszugehen.



4 Vorschlag zur Implementierung der Anforderung geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten in das Auswahlverfahren

Bild 1.1 zeigt das vom AkEnd entwickelte Verfahrensschema für die Vorgehensweise zur Standortsuche (Stand April 2002). Daraus wird ersichtlich, dass je nach Verfahrensschritt unterschiedliche Kenntnisse zu den jeweiligen Gebirgsverhältnissen und Gebirgseigenschaften vorliegen. Unterschieden wird hier generell in die die Kenntnisstufen *Schreibtisch* und *Felderkundung*. Diesen unterschiedlichen Kenntnisstufen sind im Verfahren folgende Verfahrensschritte zugeordnet:

Stufe *Schreibtischkenntnisse* ↔ Verfahrensschritt 2 sowie

Stufe *Übertageerkundungskennnisse* ↔ Verfahrensschritt 4 und

Stufe *Untertageerkundungskennnisse* ↔ Verfahrensschritt 5.

Die mit Stand Sommer 2002 abgeleiteten Kriterien sind zusammen mit den entwickelten Bewertungsmaßstäben in zwei Tabellen generalisiert aufgearbeitet und in der AG Kriterien des AkEnd vorgestellt und diskutiert worden.

Endgültige Kriterien-Tabellen für das Auswahlverfahren

Nach internen Diskussionen sind in einem von der Arbeitsgruppe Kriterien des AkEnd veranlassten Fachgespräch am 18. Juni 2002 mit Vertretern von BfS und BGR die entwickelten Kriterien-Tabellen im Hinblick auf die Kompatibilität mit der abschließenden AkEnd- Nomenklatur und die praktische Anwendbarkeit durchgesprochen worden. Dabei hat sich gezeigt, dass aus Gründen der einheitlichen Nomenklatur eine Umstrukturierung erforderlich wird und vor dem Hintergrund versteckter Doppelbewertungen eine inhaltliche Straffung der Indikatoren und der Bewertungsmaßstäbe zweckmäßig wäre.

Die in diesem Sinn abgestimmten Kriterien-Tabellen für die Anforderung *Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten* werden nachstehend als Tabelle 4.1 (Verfahrensschritt 2) und als Tabelle 4.2 (Verfahrensschritte 4, 5) zur Einarbeitung in das Standortauswahlverfahren übergeben.



Clausthal, im Dezember 2002

(Dipl.-Ing. S. Eberth)

(Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux)



Anforderung: Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten

Tabelle 4.1

Tabellarische Übersicht der Kriterien mit Indikatoren und Bewertungsmaßstab/ -skala für Verfahrensschritt 2

Hinweis: Kann ein Indikator nicht hinreichend belegt oder ermittelt werden, so sollte im Bewertungsdiagramm unter „ja/bed“ fortgefahren werden.

Indikator	Kriterium	Bewertungsmaßstab/ -skala	ja	bed	nein
I1: Veränderbarkeit der Gebirgspermeabilität bei der anthropogenen und zukünftigen geogenen Zusatzbeanspruchung im einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.	K1: Die repräsentative Gebirgspermeabilität ist gleich der repräsentativen Gesteinspermeabilität.	<ul style="list-style-type: none"> • $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} \leq 10$ • $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} \leq 100$ • $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} > 100$ 	x	x	x
	K2: Aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ist grundsätzlich die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen bekannt (unter geogener und auch teilweise technogener Beanspruchung)	<ul style="list-style-type: none"> • Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein. • Fossile Fluideinschlüsse • Unterlagernde wasserlösliche Gesteine • Unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien 			



		<p>Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert auch unter geogener/ technogener Beanspruchung</p> <p>Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/ mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.</p> <p>Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.</p>	x		
				x	
					x



<i>Indikator</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Bewertungsmaßstab/ -skala</i>	<i>ja</i>	<i>bed</i>	<i>nein</i>
	<p>K3: Das Gestein weist unter in situ- Bedingungen eine plastisch- viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz auf.</p> <p>K3a: Ausgeprägte Duktilität ohne Dilatanz unter in situ- Bedingungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Duktil/ plastisch- viskos ausgeprägt • Spröde- duktil/ elasto- viskoplastisch wenig ausgeprägt • Spröde, linear- elastisch 	x	x	x
I2:Rückbildbarkeit von technogen bedingten Rissbildungen.	<p>K4: Klüfte/ Risse im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen (→ Rückbildung der Sekundärpermeabilität)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Die Risssschließung erfolgt aufgrund eines duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig. • Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, z.B. Quelldeformationen. • Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (z.B. sprödes Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung) 	x	x	x
	<p>K5: Klüfte/ Risse im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden nach der Risssschließung geomechanisch wirksam verheilt (→ Rückbildung der mechanischen Eigenschaften).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit Mineralkornum(neu-)bildung im Rissflächenbereich • Rissverheilung nur durch Sekundärmineralisation 	x		x

Tabelle 4.1: Geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten, tabellarische Übersicht der Indikatoren mit Kriterien und Bewertungsmaßstab/ -skala für Verfahrensschritt 2



Anforderung: Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten

Tabelle 4.2

Tabellarische Übersicht der Kriterien mit Indikatoren und Bewertungsmaßstab/ -skala für Verfahrensschritt 4/5

Hinweis: Kann ein Indikator nicht hinreichend belegt oder ermittelt werden, so sollte im Bewertungsdiagramm unter „ja/bed“ fortgefahren werden.

Indikator	Kriterium	Bewertungsmaßstab/ -skala	ja	bed	nein
I1: Veränderbarkeit der Gebirgspermeabilität bei der anthropogenen und zukünftigen geogenen Zusatzbeanspruchung im einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.	K1: Die repräsentative Gebirgspermeabilität ist gleich der repräsentativen Gesteinspermeabilität.	<ul style="list-style-type: none"> • $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} \leq 10$ • $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} \leq 100$ • $K_{\text{Gebirge}}/ K_{\text{Gestein}} > 100$ 	x	x	x
	K2: Aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ist grundsätzlich die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen bekannt (unter geogener und auch teilweise technogener Beanspruchung)	<ul style="list-style-type: none"> • Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein. • Fossile Fluideinschlüsse • Unterlagernde wasserlösliche Gesteine • Unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe • Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken • Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung • Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien 			



		<p>Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert auch unter geogener/ technogener Beanspruchung</p> <p>Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/ mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.</p> <p>Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.</p>	x		
				x	
					x
	<p>K3: Das Gestein im einschlusswirksamen Gebirgsbereich weist unter in situ- Bedingungen eine plastisch- viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz auf.</p> <p>K3b: Das Gestein im einschlusswirksamen Gebirgsbereich weist signifikante plastisch- viskose Verzerrungen auf (gemessen bei $\min\sigma = 2$ MPa). Maß ist das Verhältnis der inelastischen irreversiblen Verzerrungen zu den elastisch reversiblen Verzerrungen bei einem Beanspruchungsniveau von etwa 80% der Spitzenfestigkeit (TC- oder TE- Versuch): $\epsilon^{ie}/\epsilon^e \gg 1$</p> <p>K3c: Der Dilatanzwinkel ist gering (gemessen für $\min\sigma = 2$ MPa).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • $\epsilon^{ie}/\epsilon^e > 3,0$ • $1,0 < \epsilon^{ie}/\epsilon^e \leq 3,0$ • $\epsilon^{ie}/\epsilon^e < 1,0$ <ul style="list-style-type: none"> • geringer Dilatanzwinkel $\rightarrow 0^\circ \leq \psi \leq 5^\circ$ • mittlerer Dilatanzwinkel $\rightarrow 5^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ • großer Dilatanzwinkel $\rightarrow 10^\circ < \psi$ 	x		
				x	
					x
			x		
				x	
					x



<i>Indikator</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Bewertungsmaßstab/ -skala</i>	<i>ja</i>	<i>bed</i>	<i>nein</i>
I2:Rückbildbarkeit von technogen bedingten Rissbildungen	K4: Klüfte/ Risse im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen (→ Rückbildung der Sekundärpermeabilität)	<ul style="list-style-type: none"> Die Sekundärpermeabilität des Gesteins ist bei Beanspruchungsinversion $\min \sigma \uparrow / \sigma_v \downarrow$ vollständig reversibel: $K^S \leq 10 K^P$ Die Sekundärpermeabilität des Gesteins ist bei Beanspruchungsinversion $\min \sigma \uparrow / \sigma_v \downarrow$ weitgehend reversibel: $K^S \leq 100 K^P$ Die Sekundärpermeabilität des Gesteins ist bei Beanspruchungsinversion $\min \sigma \uparrow / \sigma_v \downarrow$ nur unzureichend reversibel: $K^S > 100 K^P$ 	x	x	x
	K5: Klüfte/ Risse im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden nach der Risschließung geomechanisch wirksam verheilt (→ Rückbildung der mechanischen Eigenschaften).	<ul style="list-style-type: none"> Die Rückbildung der mechanischen Eigenschaften kann im Versuch (Zugversuch, Scherversuch) belegt werden. Die Rückbildung der mechanischen Eigenschaften kann im Versuch (Zugversuch, Scherversuch) nicht belegt werden. 	x		x

Tabelle 4.2: Geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten, tabellarische Übersicht der Indikatoren mit Kriterien und Bewertungsmaßstab/ -skala für Verfahrensschritt 4/5



5 Literaturverzeichnis

Appel, Habler, (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung, AkEnd, 2001

Atkinson, Barry Kean (1987): Fracture Mechanics of Rock, Academic Press.

Blümling/ Nagra (2001): Gespräch bei Besuch in Clausthal- Zellerfeld am Institut für Aufbereitung und Deponietechnik der TU- Clausthal, 18.10.2001.

Blümling (2001a): Telefonat am 29.11.2001 mit Herrn Blümling über die Verheilung in Tongestein, Auskünfte über Mont Terri, Nagra.

Bock, H. (2001) : Rock Mechanics Analysis and Synthesis: Data Report on Rock Mechanics, unveröffentlicht

Boutéca ; Sarda ; Vincke ; Longuemare ; Bemmer (1999) : Réflexions de l'évolution du coefficient de Biot des argilites au cours d'un chargement mécanique/ Actes des Journées NADRA/ EDP.

Chan, K. S., Brodsky, N. S., Fossum, A. F., Bodner, S. R, Munson, D. E., (1994): Damage-induced nonassociated inelastic Flow in Rock Salt, International Journal of Plasticity, Vol. 10, No. 6

Chan, K. S., Brodsky, N. S., Bodner, S. R, Munson, D. E., (1998): Recovery and Healing of Damage in WIPP- Salt, International Journal of Damage Mechanics, Vol. 7

Darot, M.; Gueguen, Y. (1986): Slow Crack Growth in Minerals and Rocks: Theory and Experiments, Pageoph, Vol. 124, Birkhäuser Verlag.

Dewhurst, D. N.; Westbrook, G. K.; Clennell, M. B.; Brown, K. M. (1998): Permeability Anisotropy in Clay- Rich Shear Zones, Fluid and Flow through Faults and Fractures in Argillaceous Rocks, pp. 287- 298, OECD, Paris.

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, Springer Verlag

Eloranta, P., Simonen, A., Johansson, E. (1992): Creep in Crystalline Rock with Application



to High Level Nuclear Waste Repository Report YJT-92-10, IVO Oy, TVO Oy, ISSN-0359-578-X, Fig. 2.2, S. 4

Ewy, R.T.; Cook, N. G. W. (1990): Deformation and Fracture around Cylindrical Openings in Rock- II. Initiation, Growth and Interaction of Fractures, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 27, No.5, pp. 409- 427, Pergamon Press Ltd..

Gartung, E [Hrsg] (1993): Tonminerale für die geotechnische Praxis, Landesgewerbeamt Bayern.

Häfner, F., Belohlavek, K.-U., Behr, A., Förster, S., Pohl, A. (2001): Abschlußbericht zum BMBW- Forschungsvorhaben „In situ Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge“, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik Fluidbergbau

Hartmann, O. (1997): Langzeitsicherheitsprognosen – Gedanken zu Vorgehen, Randbedingungen und Inhalten, Vortrag GLA/Sachsen-Anhalt - Kolloquium am 18.11.1997.

Hertzberg, Richard W. (1989): Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley & Sons.

Horseman, S. T. (1995): Key Issues in the Hydraulic and Hydrochemical Characterization of Argillaceous Rocks, Hydraulic and Hydrochemical Characterization of Argillaceous Rocks pp. 17- 38, OECD, Paris.

Hou, Z. (2001): Erweiterung des Stoffmodells Hou/Lux um den Verheilungsansatz, TU-Clausthal, Clausthal- Zellerfeld.

Hou, Z (2002): Implementierung der neu entwickelten Simulationsmodelle und Überprüfung der Implementierung, TU- Clausthal, Clausthal- Zellerfeld

Hunsche, Schulze (1994): Das Kriechverhalten von Steinsalz, Kali und Steinsalz, Bd. 11, Heft 8/9.

Janach, W. (1977): Failure of Granite under Compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 14, pp. 209-215, Pergamon Press.

Kowallis, B. J.; Wang, H. F.; Jang, B. (1987): Healed Microcrack Orientations in Granite



from Illinois Borehole UPH-3 and their Relationship to the Rock's Stress History/ Tectonophysics, 135, pp.297- 306, Elsevier Science Publishers BV.

Langer, M. (1995): Geowissenschaftliche und geotechnische Grundlagen für die Errichtung und Nutzung von Holräumen im Salinar, Nutzung bergbaulicher Hohlräume als Speicher und Deponien sowie Verwertung von Reststoffen/ Abfällen im Bergbau unter besonderer Berücksichtigung gebirgsmechanischer Aspekte. Vorträge anlässlich des Kolloquiums am 26.- 27. Oktober 1995, Schriftenreihe 6 der Abteilung Geomechanik, Institut für Bergbau, TU- Clausthal, herausgegeben von Prof. Lux

Lama, R. D.; Vutukuri, V. S. (1974): Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol.2, Trans Tech Publications.

Logan, J. M. (1998): Relevance of Faults and Fractures to Fluid Flow in Argillaceous Rocks/ Fluid and Flow through Faults and Fractures in Argillaceous Rocks, pp. 63- 74/ OECD, Paris.

Lux, K.-H. (1984): Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau, Enke Verlag, Stuttgart

Lux et al. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil A, Gutachten im Auftrag des AkEnd, 2001, TU- Clausthal, Professur für Deponietechnik und Geomechanik

*Martin, C. D., Lanyon, G. W. (2001):*EDZ in Clay Shale: Mont Terri (draft of review), Report of Geoscience Ltd., unveröffentlicht

Palmstrøm, A. (1985) : Application of the volumetric joint measure of rock mass jointing in: Fundamentals of Rock Joints. Proc. Int. Symposium, Björkliden, Centick Publishers, ISBN91-86998-03-X.

Richter, D. (1989): Ingenieur- und Hydrogeologie Verlag De Gruyter, ISBN 3-11-008547-X

Rummel (1986): DGMK- Bericht 167-4, Basisdaten und Modelluntersuchungen zur Rissausbreitung bei Stimulationsuntersuchungen in geringpermeablen Sedimenten der norddeutschen Erdgasträgerformationen.

Saxena, Ashok (1998): Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers, CRC Press.



Silberschmidt, V.G., Silberschmidt, V.V. (2000): Analysis of Cracking in Rock Salt, Rock Mech. Engng..

Souley, M.; Homand, F.; Pepa, S. and D.; Hoxha (2001): Damage-induced permeability Changes in Granite: a case example at the URL in Canada. Int. Journal of Rock Mechanics an Mining Sciences (38), p. 297 – 310.

Sprunt, E. S.; Nur, A. (1979): Microcracking and Healing in Granites: New Evidence from Cathodoluminescence/ Science, Vol. 205.

Stormont, j. C. (1990): Gas Permeability Changes in Rock Salt during Deformation, PhD Thesis, University of Arizona

Stormont, J. C., Daemen, J. J. K., Desai, C. S. (1992): Prediction of Dilation and Permeability Changes in Rock Salt; Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomech., Vol. 16

Weber, Jan Richard (1994): Untersuchungen zur Permeabilitätsdilatanz kristalliner Gesteine unter deviatorischer Belastung, TU- Clausthal.

Xie, Z., (2002): Rechnerische Untersuchungen zum mechanische und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien im Fall eines Lösungszutritts, Dissertation an der TU- Clausthal