

Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Anhang Wirtsgesteine

Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften



30.09.2008

Bearbeiter:

Brasser, T.

Herbert, H.J.

Miehe, R.

Schmidt, G.

**Braunschweig / Darmstadt
September 2008**

**Anhang zu GRS-247
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Generelle Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine	5
2.1	Übersicht und Anforderungen	8
2.2	Sedimentgesteine	18
2.2.1	Salzgesteine.....	19
2.2.2	Tongesteine	26
2.2.3	Sonstige Sedimentgesteine (Tuff).....	33
2.3	Magmatische Gesteine	34
2.3.1	Granit	36
2.3.2	Sonstige magmatische Gesteine (Basalt).....	39
3	Barriereeigenschaften der Wirtsgesteine	42
3.1	Mögliche Barriereeigenschaften.....	42
3.2	Salzgesteine.....	51
3.2.1	Prinzip der Abfallisolierung.....	52
3.2.2	Eigenschaften	63
3.3	Tongesteine	70
3.3.1	Prinzip der Abfallisolierung.....	73
3.3.2	Eigenschaften	75
3.3.3	Tongesteine an ausgewählten Standorten.....	80
3.4	Granitmassive	87
3.4.1	Generelles, Prinzip der Abfallisolierung und Anforderungen.....	87
3.4.2	Eigenschaften	90
3.4.3	Internationale Erfahrungen.....	93
4	Wirtsgestein als Teil des Mehrbarrierenkonzepts	96
4.1	Allgemeines.....	96
4.2	Wirtsgesteinsspezifika im Mehrbarrierenkonzept.....	98
4.3	Überlegungen zu einem Standortauswahlverfahren	101
4.4	Bewertungsmatrix	104

5	Literatur.....	109
6	Weiterführende Literatur	122

1 Einleitung

Ein langzeitsicherer Einschluss radioaktiver Abfälle und damit deren Isolation innerhalb des Endlagers können durch ein Mehrbarrierensystem aus geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren gewährleistet werden. Bei den in Deutschland verfolgten Konzepten kommt der geologischen Barriere die entscheidende und langfristig wirksame Bedeutung zu. Ausschlaggebend für die Eignung eines Endlagerstandortes ist in diesem Zusammenhang allerdings die „günstige geologische Gesamtsituation“ /AAE 02/. Diese liegt dann vor, wenn die geologischen Verhältnisse an einem Standort in ihrer Gesamtheit es erlauben, die Anforderungen an den Isolationszeitraum sowie an die Schutzziele und Sicherheitskriterien mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erfüllen. Von besonderer Bedeutung bei der Ermittlung einer günstigen geologischen Gesamtsituation sind die Eigenschaften des „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“. Das ist der Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers und im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren den Einschluss der Abfälle über den geforderten Isolationszeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren sicherstellen muss. Er besteht aus dem Wirtsgestein selbst und ggf. weiteren, den eigentlichen Endlagerbereich umgebenden geologischen Formationen (Abb. 1).

Als Wirtsgesteine für Endlager werden weltweit insbesondere Steinsalz, Ton, Tuff und kristalline Gesteine, wie zum Beispiel Granit, in Erwägung gezogen und im Hinblick auf ihre Eignung untersucht. Insgesamt muss das Wirtsgestein eine Reihe von Anforderungen erfüllen, wobei folgende wesentliche, gesteinspezifische Unterschiede bestehen:

- Bei einem Endlager in Salzformationen (Salzstöcke oder flache Lagerung) erfolgt - bei ungestörten Verhältnissen - der Einschluss der Abfälle in erster Linie durch das undurchlässige und homogene Wirtsgestein.
- Im Fall plastisch-toniger Sedimente bzw. Sedimentgesteine sind sowohl die Barriere Wirkung der Geosphäre als auch (temporär) die technischen/geotechnischen Barrieren für den Sicherheitsnachweis bedeutsam.
- Bei kristallinen Wirtsgesteinen und stark konsolidierten (verfestigten und geklüfteten) Sedimenten ist insbesondere das System der technischen Barrieren für Einschluss und Rückhaltung der Radionuklide von Bedeutung.

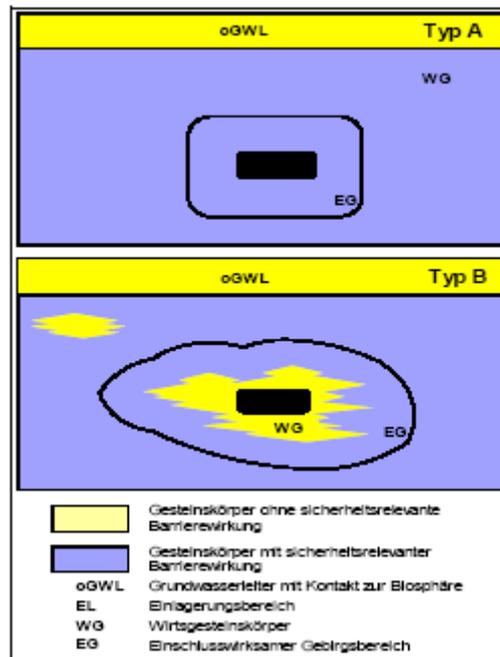


Abb. 1 Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein (WG) und einschlusswirksamem Gebirgsbereich (EG); Typ A (oben): das Wirtsgestein ist sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches; Typ B (unten): das Wirtsgestein ist kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches /AAE 02/

In den nachfolgenden Kapiteln werden grundlegende Eigenschaften sowie spezifische Barriereigenschaften der unterschiedlichen Wirtsgesteine beschrieben und schließlich bewertend gegenüber gestellt.

2 Generelle Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine

Als potenzielle und global verbreitete Wirtsgesteine für die Einrichtung eines Endlagers kommen verschiedene geologische Formationen in Betracht. Die tatsächliche Eignung des jeweiligen Wirtsgesteins muss aber letztendlich standortspezifisch unter Berücksichtigung des gesamten Endlagerkonzeptes und unter Einbeziehung aller geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren geprüft und bewertet werden.

Weltweit werden in erster Linie Salzformationen, Tonformationen, kristalline Gesteine sowie vulkanische Tuffe als Wirtsgesteine untersucht. Für den europäischen Raum ist bereits Anfang der 1980er Jahre von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften ein Kartenwerk zusammengestellt worden, das die Verbreitung potenziell geeigneter Wirtsgesteine Ton, Salz und Kristallin darstellt /CAD 84/ (Abb. 2). Diese Wirtsgesteine unterscheiden sich deutlich in ihren jeweiligen Eigenschaften. Aus diesem Grunde müssen zunächst grundsätzlich geeignete geologische Systeme definiert werden:

- Gesteine mit extrem niedriger hydraulischer Durchlässigkeit, in denen ein advektiver Grundwasserfluss nahezu ausgeschlossen ist. Beispiele hierfür sind massive Evaporit-Vorkommen (Salzstöcke, mächtige Salzablagerungen) oder plastische Tone. In solchen Wirtsgesteinen ist die mögliche Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden auf extrem langsame Diffusionsprozesse mittels Porenwasser begrenzt.
- Tiefe Grundwassersysteme mit einem nachgewiesenen äußerst geringen advektiven Grundwasserfluss über lange Zeiträume (> 100.000 a). Tiefe Grundwässer sind darüber hinaus meist versalzen und nehmen nicht oder nur in geringem Umfang am Wasserkreislauf teil. Sie stellen außerdem meist ein chemisch reduzierendes Milieu ein, das die Mobilisierung und den Transport vieler Radionuklide verlangsamt.
- Grundwassersysteme mit geringen Fließgeschwindigkeiten in Kombination mit langen Transportwegen. Beispiele für solche Systeme sind eine mehrere 100 m mächtige ungesättigte Zone (mit langen Transportwegen und langsamer Migration in tiefere Grundwasserkörper), aber auch wassergesättigte Gesteine in sedimentären Becken mit langsamer Infiltration in größere Tiefen vor einem eventuellen Abfluss.

Auf dieser Basis orientieren sich die Endlagerkonzepte in den Ländern mit Kernenergienutzung - was das Wirtsgestein anbetrifft - an der jeweiligen geologischen Situation. In kleinen Ländern oder Ländern mit einem vorherrschenden Gesteinstyp kann ggf. nur ein Wirtsgestein berücksichtigt werden (Schweden, Schweiz) (Tab. 1).

Tab. 1 Unterschiedliche Wirtsgesteinstypen und Länder, die ein Endlager für feste radioaktive Abfälle im betreffenden Wirtsgestein erwägen (nach IAEA 03/)

Wirtsgestein	Beispiel-Länder
<ul style="list-style-type: none"> • Steinsalz-Formationen 	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Salzstöcke 	Deutschland
<ul style="list-style-type: none"> ○ Flache Lagerung 	USA
<ul style="list-style-type: none"> • Ton-Formationen 	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Konsolidierte Tonsteine, Ton-schiefer, Mergel 	Frankreich, Schweiz, Ungarn
<ul style="list-style-type: none"> ○ Plastische Tone 	Belgien
<ul style="list-style-type: none"> • Kristalline Gesteine (Granit, Gneis)^{*)} 	China, Finnland, Kanada, Schweden
<ul style="list-style-type: none"> • Vulkanische Tuffe 	USA

^{*)} Unter „Kristalline Gesteine“ werden grundsätzlich alle Gesteine verstanden, die aus kristallisierten Mineralen bestehen. Dazu gehören in erster Linie intrusive Magmatite, wie Granit und metamorphe Gesteine (z. B. Gneis). Aber auch Sedimentgesteine können kristallin sein (z. B. kristalline Kalksteine) bzw. setzen sich zum großen Teil aus der Akkumulation kristallinen Ausgangsmaterials zusammen. In Bezug auf Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wird der Ausdruck „Kristalline Gesteine“ meist als Oberbegriff für intrusive Magmen und metamorphe Gesteine verwendet. Extrusive Magmatite (z. B. Basalt) mit ihrem hohen Glasanteil stellen dagegen keine kristallinen Gesteine dar.

In der Bundesrepublik Deutschland wie auch in den USA hat man bereits in den 1950er Jahren Steinsalz, insbesondere im Hinblick auf die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, als geeignetes Wirtsgestein für ein Endlager identifiziert.

Erst mit dem so genannten Gorleben-Moratorium ist in Deutschland diese Festlegung im Jahr 2000 für einen Zeitraum von 3 bis 10 Jahren ausgesetzt worden, um auch andere geeignete Formationen in die Eignungsuntersuchungen einzubeziehen. Die Verbreitung bedeutender Vorkommen von Salzgesteinen sowie Tonformationen und Kristallin-Komplexen in der Bundesrepublik Deutschland ist in Abb. 3 graphisch dargestellt.

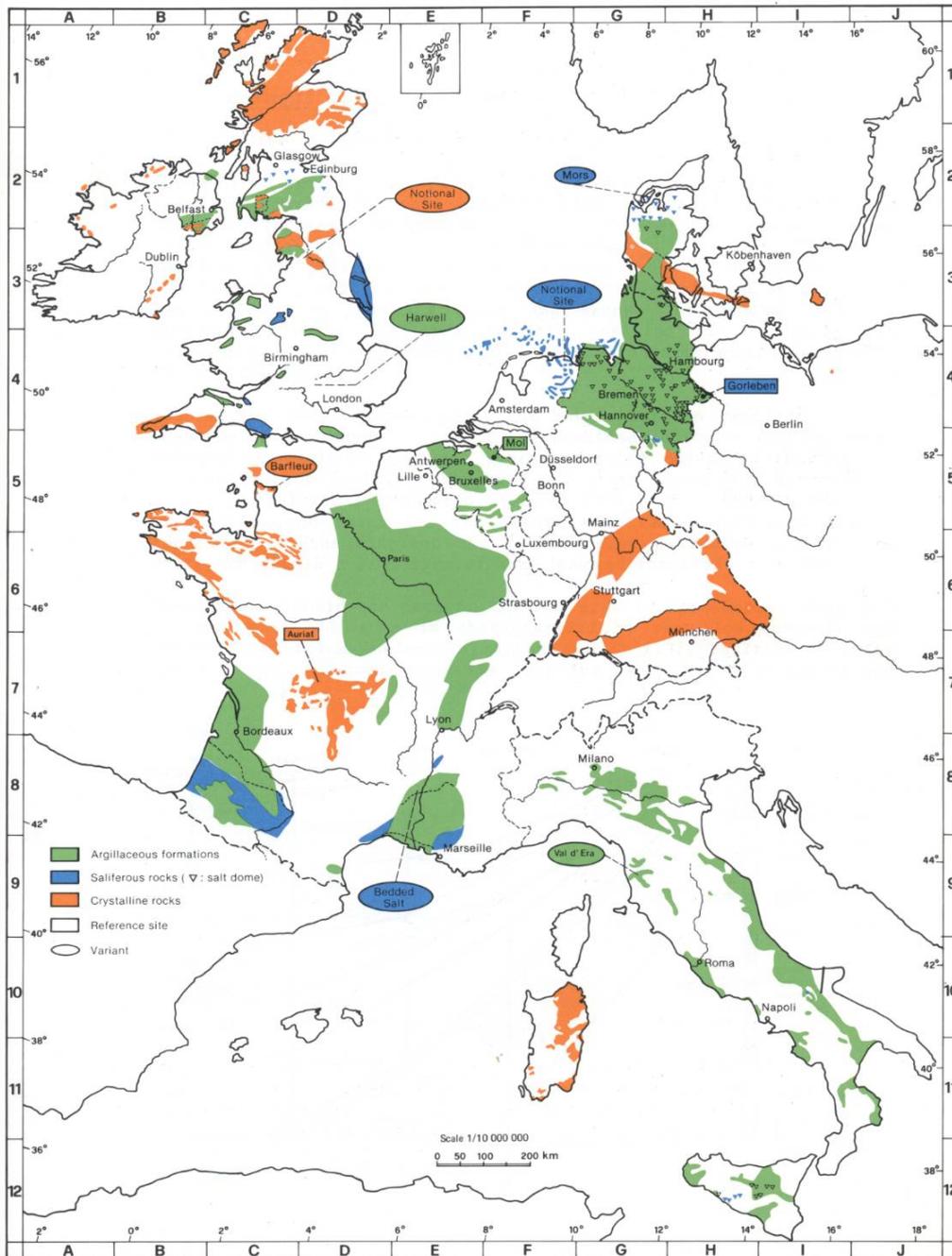


Abb. 2 Verbreitung geeigneter Formationen (Wirtsgesteine) für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Europa /CAD 84/. In dieser „historischen“ Karte sind neuere Erkenntnisse sowie die Verbreitung der jeweiligen Formationen im ostdeutschen bzw. osteuropäischen Raum noch nicht dargestellt. Legende: grün = Ton- und Tonsteinformationen, blau = Salzgesteine, orange = kristalline Gesteine.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst eine Übersicht über die Anforderungen an Wirtsgesteine gegeben und dann auf Entstehung, Bedeutung und spezifische

Eigenschaften von Sedimentgesteinen (Salz, Ton) und magmatischen Gesteinen (Granit, Basalt) eingegangen. Im Anschluss daran erfolgt eine Fokussierung auf besonders endlagerrelevante Barriereigenschaften dieser Wirtsgesteine.

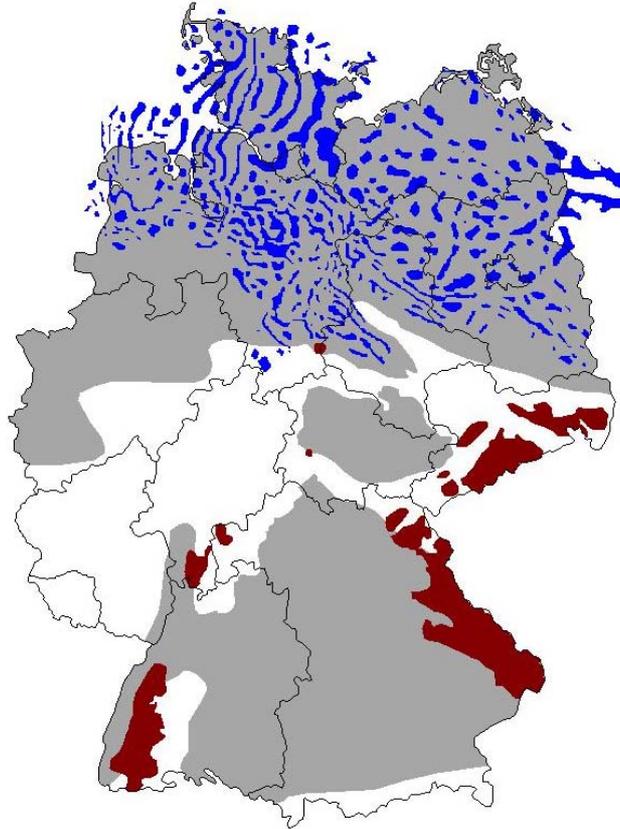


Abb. 3 Verbreitung bedeutender potenzieller Wirtsgesteinsformationen in der Bundesrepublik Deutschland. Legende: blau = Salzstöcke in Norddeutschland; grau = Tonformationen; braun = Kristallinvorkommen (Plutonite und metamorphe Gesteine). Salzvorkommen in Mittel- und Süddeutschland sind in dieser Abbildung nicht dargestellt (Zeichnung GRS, nach einer Vorlage aus /KEL 02/)

2.1 Übersicht und Anforderungen

Die wesentlichen heute untersuchten Wirtsgesteinstypen (Steinsalz, Ton, Kristallin, Tuff) unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Gesteinscharakteristika, des möglichen Grundwasserregimes und der potenziellen Radionuklid-Transportmechanismen (Tab. 2, Tab. 3).

Tab. 2 Gesteinscharakteristika, mögliche Grundwasserregime und potenzielle Radionuklid-Transportmechanismen unterschiedlicher Wirtsgesteine (nach /IAE 03/)

Wirtsgestein	Gesteins-Charakteristika Grundwasser-Regime	Radionuklid-Transport-Mechanismen
• Steinsalz-Formationen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine offenen Klüfte, keine Porenräume ▪ Kein Grundwasser 	Kein Transport
• Ton-Formationen		
○ Konsolidierte Tonsteine, Tonschiefer, Mergel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klüfte, Trennflächen ▪ Geringe Grundwasserströmung 	Advektion, Diffusion
○ Plastische Tone	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine offenen Klüfte ▪ Stagnierendes Porenwasser 	Diffusion
• Kristalline Gesteine (Granit, Gneis)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geklüftetes Gestein ▪ Grundwasserströmung in offenen Klüften 	Advektion
• Vulkanische Tuffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klüfte und Porenräume (ungesättigt) ▪ Zeitweise Durchströmung von Infiltrationswasser 	Gravitation, Advektion

In Ergänzung der bereits oben dargestellten grundsätzlich geeigneten geologischen Systeme ergeben sich in Zusammenfassung internationaler Regelwerke und Empfehlungen insgesamt folgende Anforderungen an ein Wirtsgestein (nach /BOR 01/):

- Die Wirtsformation soll gegenüber geodynamischen Einwirkungen (z. B. Erdbeben / neotektonische Bewegungen) stabil sein
- Form und Größe des Wirtsgesteins (inklusive einer Schutzzone) sollen genügend Flexibilität hinsichtlich Konfiguration und Auslegung des Endlagers besitzen
- Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften sollen einen sicheren Bau, Betrieb und Verschluss eines Endlagers ermöglichen
- Das Wirtsgestein soll eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten haben.

Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Gesteine am Beispiel deren Druckfestigkeiten erfolgt in Tab. 3.

Tab. 3: Einaxiale Druckfestigkeiten von Gesteinen (nach /TUF 08/)

Gestein	Druckfestigkeit [N/mm ²]
Basalt, Quarzit	250 - 350
Granit, Gabbro	150 - 250
Gneis	100 - 150
Quarzitischer Sandstein	80 - 100
Sandstein, Kalkstein, Anhydrit	30 - 80
Tonschiefer, Steinsalz	20 - 30
Tonstein, Tuff, Carnallit	10 - 20
Tonstein, Braunkohle	5 - 10
Tone	< 5

- **Steinsalz-Formationen**

Steinsalz ist das geologische Medium, das bereits in den 1950er Jahren in den USA als Wirtsgestein für die Endlagerung vorgeschlagen wurde. Die bis zum Jahr 2000 gültige Festlegung auf Steinsalz als Wirtsgestein für ein Endlager in Deutschland geht auf ein 1963 erstelltes Gutachten der damaligen Bundesanstalt für Bodenforschung (BfB, heute: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - BGR) zurück. Diese Festlegung basierte auf folgenden Gründen (nach /GNS 04/, ergänzt):

- Steinsalz-Lagerstätten sind in Deutschland in großer Zahl vorhanden und treten in riesigen Akkumulationen (insbesondere in Salzstöcken) auf
- Steinsalz zeichnet sich durch extrem niedrige Permeabilitäten für Wasser und Gas sowie geringe Wassergehalte aus
- Steinsalz verhält sich bei auftretendem Druck plastisch und die hohe Visko-plastizität nimmt mit steigender/m Temperatur und Druck noch zu. Damit wird das Auftreten von zusammenhängenden Klüften und Spalten weitgehend verhindert und die Selbst(ver)heilung offener Klüfte und Hohlräume ermöglicht

- Steinsalz ermöglicht wegen seiner gebirgsmechanischen Eigenschaften die Herstellung großer Hohlräume ohne speziellen Ausbau
- Steinsalz hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Im Gegensatz zu anderen Gesteinen (z. B. Tonstein) können wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle darin besser eingelagert werden, da Steinsalz eine Ableitung der Zerfallswärme begünstigt und dadurch eine Gebirgsaufheizung reduziert wird
- Steinsalz-Lagerstätten haben sich - trotz der Wasserlöslichkeit von Evaporitmineralen - über viele Millionen Jahre als sehr beständig erwiesen. Die meisten und bedeutendsten Salzvorkommen in Deutschland wurden im Zechstein gebildet und sind damit ca. 250 Millionen Jahre alt. Trotz tiefgreifender geologischer Ereignisse in ihrem Umfeld (z. B. Überflutung des norddeutschen Beckens, Aufstieg der Alpen, Eiszeiten) hatten die Zechsteinsalze im Inneren der Salzstöcke seit ihrer Entstehung keinen Kontakt zu wasserführenden Schichten
- Die geologischen, bergmännischen und technischen Erfahrungen, die in mehr als einem Jahrhundert Salzbergbau in Deutschland gewonnen wurden, können für die Endlagerung genutzt werden.

Salzformationen kommen darüber hinaus oft in geologisch stabilen Regionen mit geringer Erdbebenaktivität vor. Die Mächtigkeit vieler Salzablagerungen belegt die stabilen geodynamischen Verhältnisse während der viele Millionen Jahre andauernden Sedimentation.

Mögliche Beeinträchtigungen

Besonders nachteilig auf die gewünschten/geforderten Wirtsgesteinseigenschaften können sich alle Prozesse auswirken, die eine (Auf-)Lösung des Salzgesteins bewirken; hierzu gehören beispielsweise klimatische Fluktuationen, die generelle geodynamische Evolution sowie verschiedene tektonische Faktoren. Auch die Einlagerung der Abfälle selbst kann Auswirkungen auf das Verhalten der Salzformation haben, wie z. B. thermische Effekte (Kriechen, Korrosion, Migration), Radiolyse-Effekte und Gasbildung.

- **Ton-Formationen**

In Abhängigkeit vom Grad der diagenetischen Verfestigung und dem Wassergehalt wird zwischen plastischem Ton und konsolidierten Tonsteinen unterschieden. Die besonderen Vorzüge von Tonformationen als Wirtsgestein liegen in der sehr niedrigen hydraulischen Leitfähigkeit, dem hohen Sorptionsvermögen, der wirksamen Filtrationswirkung gegenüber Kolloiden und großen Molekülen, der geringen Löslichkeit der Tonbestandteile und - beim plastischen Ton - den Selbst(ver)heilungseigenschaften, die eine Wiederherstellung der ursprünglichen Verhältnisse nach einem Eingriff oder einer Störung begünstigen.

Die niedrige hydraulische Leitfähigkeit und das hohe Sorptionsvermögen stehen in direkter Beziehung zum Gehalt an Tonmineralen: je höher der Tonmineralgehalt, desto besser die Barrierefunktion. Die günstigen Wirtsgesteinseigenschaften resultieren aus der großen spezifischen Oberfläche der Tonminerale, der geringen Porengröße sowie den physiko-chemischen Wechselwirkungen zwischen Tonmineralen, Wassermolekülen und gelösten chemischen Spezies.

Mögliche Beeinträchtigungen

Mögliche Beeinträchtigungen der Wirtsgesteinseigenschaften können durch externe natürliche Kräfte erfolgen, wie z. B. klimatische Änderungen, Erosion, Gebirgshebungen und Gebirgssenkungen, oder aber auch durch die Errichtung und den Betrieb des Endlagers selbst.

- **Kristalline Gesteine (Granit, Gneis)**

Kristalline Gesteine wie z. B. Granit (= magmatisches Gestein) oder Gneis (= metamorphes Gestein; siehe Kasten Gesteinskreislauf), zeichnen sich durch eine hohe mechanische Festigkeit aus, die das Abteufen und den Vortrieb standfester Schächte, Strecken und Einlagerungskammern in eine(r) für die Endlagerung geeigneten Tiefe erlaubt. Darüber hinaus ist die räumliche Ausdehnung von Kristallinkomplexen (horizontal wie vertikal) oft sehr groß.

Generell weisen kristalline Gesteine selbst eine nur geringe hydraulische Durchlässigkeit auf. Grundwasserströmung findet aber vornehmlich in einem Netzwerk aus miteinander verbundenen Klüften statt. Sowohl die Gesteinsmatrix wie auch Kluffüllungen

enthalten Minerale, die Radionuklide sorbieren, so dass der Transport vieler Radionuklide durch Sorption verzögert wird. Aufgrund der geringen Matrixpermeabilität und Matrixporosität geschieht Transport innerhalb der Matrix in erster Linie durch Diffusion, die hier ebenfalls sehr langsam abläuft. Der Transport großer Moleküle kann darüber hinaus durch die Filtrationswirkung der Gesteinsmatrix verhindert werden.

Kristalline Gesteine sind durch sehr geringe Löslichkeit gekennzeichnet, so dass die Bildung neuer Fließwege aufgrund von Lösungsvorgängen kein signifikantes Gefährdungspotenzial darstellt. Sie weisen auch generell eine gute Wärmeleitfähigkeit auf, so dass die in Abfällen generierte Wärme leicht abgeführt werden kann. Thermische Auswirkungen auf technische Barrieren und das umgebende Gestein werden so minimiert.

Mögliche Beeinträchtigungen

Aufgrund der hohen Festigkeit und geringen Löslichkeit kristalliner Gesteine sind größere Veränderungen in den Wasserwegsamkeiten nach Verschluss eines Endlagers nicht zu erwarten. Nachteilige Veränderungen der Wirtsgesteinseigenschaften sind durch zusätzliche tektonische Spannungen oder bedeutende Erosion möglich, wie sie in tektonisch aktiven Gebieten auftreten. Derartige Gebiete werden aber im Rahmen des Standortauswahlverfahrens ausgeschlossen. Bedeutende Spannungsänderungen können auch durch die zusätzliche Auflast während einer Vereisung hervorgerufen werden. Substanzielle Änderungen des hydraulischen Gradienten im hydrogeologischen System sind nur bei Änderungen der Fließwege oder der in situ-Spannungen sowie bei Vereisung oder Erwärmung zu erwarten /IAE 99/.

- **Vulkanische Tuffe**

Tuff-Formationen weisen eine Reihe von Eigenschaften auf, die für ein Endlager von radioaktiven Abfällen von Vorteil sind. Der Gehalt an Zeolithen (Gruppe von Gerüstsilikaten mit austauschbaren Kationen) und Tonmineralen bewirkt ein hohes Sorptionsvermögen gegenüber Radionukliden. Tuff-Abfolgen sind meist geschichtet, auftretende Klüfte schichtgebunden, so dass ein Kluffnetzwerk generell unterbrochen wird (mit Ausnahme größerer Störungszonen). Tuff-Formationen besitzen außerdem eine hohe Matrix-Porosität, welche die Matrix-Diffusion von Radionukliden erhöht.

In der ungesättigten Zone arider Gebiete bewirken außerdem die sehr geringen effektiven Permeabilitäten sowie Kapillar-Effekte eine Erhöhung des Isolationspotenzials. Bei

Errichtung eines Endlagers in geklüfteten Bereichen einer Tuff-Formation in der ungesättigten Zone sorgt eine freie Drainage evtl. zutretender Wässer für minimale Kontaktzeiten zwischen Wasser und Abfallgebänden.

Mögliche Beeinträchtigungen

Tuff-Formationen kommen grundsätzlich in Gebieten vor, die - zumindest in der geologischen Vergangenheit - tektonisch aktiv gewesen sind. Es hängt vom Alter und der geologischen Entwicklung des Gebietes ab, ob diese tektonische Aktivität noch anhält. Bei einem Endlager in der ungesättigten Zone können klimatische Veränderungen eine Anhebung des Grundwasserspiegels und damit einen Kontakt zwischen Wasser und Abfall bewirken. Wärmeentwickelnder Abfall selbst kann darüber hinaus Mobilisierung oder Ausfällung von Mineralphasen im Porenwasser bewirken, verbunden mit Änderungen der Matrix- oder Kluftpermeabilität. Außerdem können Änderungen in der Struktur oder Zusammensetzung von Mineralen auftreten und Temperaturänderungen mechanische Spannungen im umgebenden Gebirge verursachen. Bei einem Endlager in der ungesättigten Zone kann Porenwasser als Wasserdampf mobilisiert werden und in kühleren Bereichen wieder kondensieren /IAE 99/.

• **Resultierende Anforderungen**

Die zu Kapitelbeginn aufgeführten generellen Anforderungen an ein Wirtsgestein sind im Jahr 2006 durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) /BGR 06/ weitergehend spezifiziert worden und umfassen nunmehr folgende Punkte:

- Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 /DIN 05/
- In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein und aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m pro Sekunde zugeordnet werden kann
- Die Tiefenlage der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1.500 m liegen

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (mind. 10 km² in Tongestein)
- Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

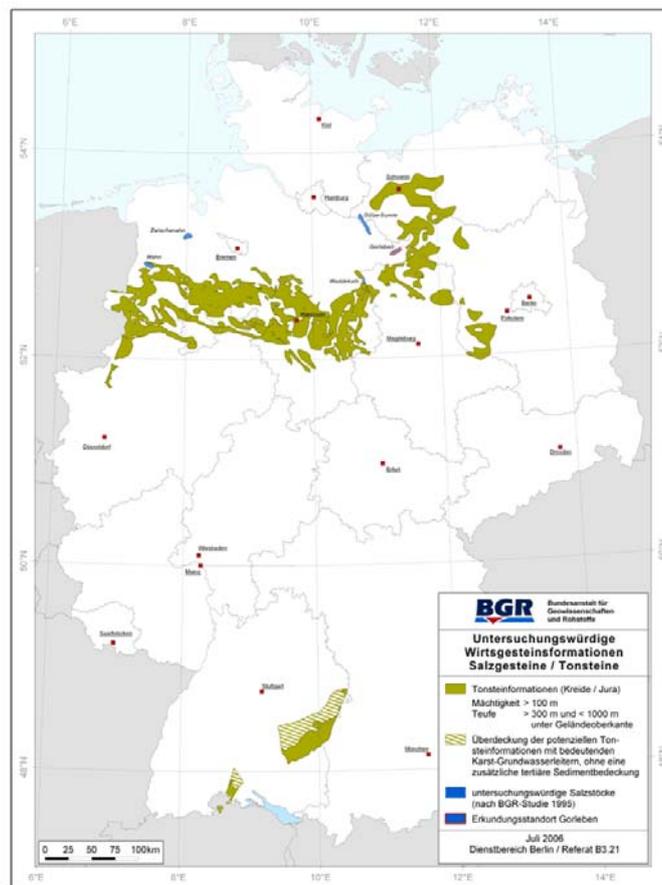


Abb. 4 Karte der untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen (Salzgesteine / Tonsteine) in Deutschland /BGR 06/

Legt man diese Mindestanforderungen und Kriterien zugrunde, kommen nach /BGR 06/ für die Ausweisung von Wirtsgesteinsregionen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland aufgrund ihrer ausreichend geringen Durchlässigkeit lediglich Steinsalzformationen und Tonsteinformationen in Betracht. Kristallingesteine werden wegen ihrer hohen Durchlässigkeit in klüftigen Bereichen sowie nicht ausreichend

großer Homogenbereiche in Deutschland ausgeschlossen. Die Karte „Verbreitung bedeutender potenzieller Wirtsgesteinsformationen in Deutschland“ (Abb. 3) ist deshalb auf Grundlage der spezifizierten Anforderungen an die Wirtsgesteine überarbeitet worden und in Abb. 4 wiedergegeben /BGR 06/.

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Kapitel erfolgt in einem separaten Kasten ein kurzer Abriss des Gesteinskreislaufs mit seinen wichtigsten gesteinsbildenden und gesteinsverändernden Prozessen.

Gesteinsbildende und -verändernde Prozesse - Der Gesteinskreislauf

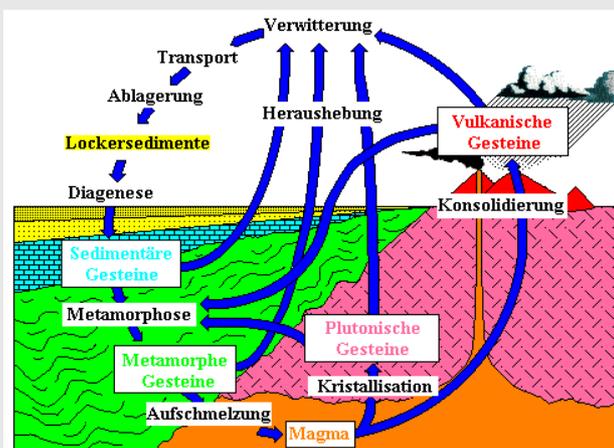
Mit den in ihnen enthaltenen Informationen über erdgeschichtliche Entwicklungen und Entstehungsbedingungen dokumentieren Gesteine vergangene geologische Prozesse. Diese werden unterschieden in:

- A) **Exogene Prozesse**, die an der Erdoberfläche ablaufen und Erosion, Transport sowie Sedimentation umfassen
- B) **Endogene Prozesse**, die im Erdinneren stattfinden.

Je nach ihrer Bildungsart werden drei Gesteinsgruppen unterschieden:

- 1) **Sedimentgesteine** (auch: Sedimentite, Ablagerungsgesteine), die durch mechanische, chemische oder biogene Absätze aus dem Wasser oder der Luft entstehen und im Zuge der Diagenese verfestigen [Beispiele: Sandstein, Tonstein, Salzgestein, Kalkstein]. Der Oberbegriff „Sedimente“ umfasst sowohl verfestigte Sedimentgesteine als auch Lockersedimente.
- 2) **Magmatische Gesteine** (auch: Magmatite, Erstarrungsgesteine), die durch Erstarrung heißer natürlicher Gesteinsschmelzen im Erdmantel oder tiefen Bereichen der Erdkruste (Plutonite) [Beispiel: Granit] oder auf bzw. nahe der Erdoberfläche (Vulkanite) [Beispiel: Basalt] entstehen.
- 3) **Metamorphe Gesteine** (auch: Metamorphite, Umwandlungsgesteine), die durch mechanische oder physiko-chemische Umwandlung unter Einwirkung von hohen Temperaturen bzw. hohem Druck (Metamorphose) aus Magmatiten oder Sedimentiten [Beispiele: Gneis, Marmor] entstehen.

Diese drei Gesteinsgruppen stehen über den Kreislauf der Gesteine miteinander in Beziehung, wobei die einzelnen Gesteinsgruppen unter Einwirkung unterschiedlicher Ursachen (s. o., zusätzlich unterstützt u. a. durch Luft- und Wasserkreislauf, Temperatur- und Druckänderungen) ineinander übergehen. Dieser Kreislauf ist in der Abbildung dargestellt: An Land verwittern die Gesteine durch chemische und physikalische Einwirkung von Wasser, Wind, Eis, Temperaturunterschieden etc., werden über Wasser und/oder Luft verfrachtet, wieder abgelagert und bilden damit Sedimente. Durch immer weitere Sedimentation werden die Schichtpakete mächtiger und verfestigen infolge von Diagenese zu Sedimentgesteinen. Bei höheren Drücken und Temperaturen verändert sich auch die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine, wodurch diese letztendlich zu Metamorphiten umgewandelt werden. In größeren Erdtiefen können aus festen Gesteinen Schmelzen separieren, die wieder in die obere Erdkruste und an die Erdoberfläche steigen und dort neue Gesteine bilden - die so genannten Magmatite (Plutonite und Vulkanite).



Der Kreislauf der Gesteine /MIN 07b/

2.2 Sedimentgesteine

Von der Vielzahl der an bzw. nahe der Erdoberfläche vorkommenden Gesteine eignet sich grundsätzlich auch eine Reihe von Sedimentgesteinen (Sedimentiten) als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle. Dies sind i. W. Salzgesteine (Evaporite), Tonsteine und - bei ausreichender Mächtigkeit und günstiger geologischer Gesamtsituation - auch Tuffsteine /FÜC 88/. Auf diese Gesteinsarten wird in den nachfolgenden Abschnitten näher eingegangen.

- **Genese**

Sedimentäre Gesteine entstehen aus den Verwitterungsprodukten älterer Gesteine und / oder durch chemische bzw. biogene Ablagerungen und werden deshalb generell in klastische, chemische und biogene Sedimente unterteilt.

Klastische Sedimente

Klastische Sedimente (z. B. Kiese, Konglomerate, Sande, Sandsteine, Tone, Tonsteine) stellen Gesteinsbruchstücke und Minerale dar, die bei der physikalisch-mechanischen Verwitterung des Ausgangsgesteins entstehen oder sich bei der (bio-)chemischen Verwitterung aus anderen Gesteinen bilden. Diese festen Verwitterungsprodukte werden durch Schwerkraft, Wasser- und Windströmungen sowie durch Gletschereis abtransportiert, wobei sie auf diesem Transportweg mehrfach abgelagert und wieder umgelagert werden können. Klastische Sedimente werden vor allem nach ihrem Gefüge und insbesondere ihrer Korngröße benannt (Tab. 4).

Tab. 4 Einteilung von klastischen Sedimenten nach der Korngröße /DIN 87/

Partikelgröße	Unverfestigtes Sediment	Verfestigtes Sedimentgestein
> 63 mm	Steine	Konglomerat, Brekzie
2 – 63 mm	Kies	
0,063 – 2 mm	Sand	Sandstein
0,002 – 0,063 mm	Schluff, Silt	Schluffstein, Siltstein
< 0,002 mm	Ton	Tonstein

Chemische und biogene Sedimente

Chemische und biogene Sedimente (z. B. Kalksteine, Evaporite, Eisenerze, Phosphorgesteine) entstehen aus den Mineralbestandteilen, die bei der chemischen Verwitterung im Wasser gelöst werden. Durch chemische und biochemische Reaktionen werden diese Ionen aus der Lösung ausgefällt und in Form von festen Partikeln sedimentiert.

- **Diagenese**

Sedimente bilden sich an der Erdoberfläche zunächst in Form von Schichten aus locker gelagerten Teilchen, wie Kiese, Sande, Tone oder Skelettteilchen von Organismen. Diese lockere Anordnung der Komponenten bedingt eine große Anzahl von Hohlräumen (Poren), die überwiegend mit Wasser gefüllt sind. Darüber hinaus enthalten Sedimente oft Tonminerale, die chemisch gebundenes Wasser (im Kristallgitter) führen. Bei der späteren Verfestigung und Kompaktierung durch Einwirkung von Druck und Temperatur sowie der Lösung und Neubildung von Mineralphasen (Diagenese) verringern sich generell der Porenraum und damit auch der Wassergehalt. Die Sedimentgesteine tragen dann oft ihre Ursprungsbezeichnung mit dem Zusatz „-stein“ (z. B. Sandstein - siehe Tab. 4).

2.2.1 Salzgesteine

- **Genese und Zusammensetzung**

Salzgesteine (Evaporite) sind chemische Sedimente, die aus eindunstenden wässrigen Lösungen ausgefällt werden. Solche Lösungen können unter- und oberirdisches Wasser des Festlandbereiches und das Meerwasser sein.

Die größten Evaporitvorkommen sind marinen Ursprungs (in den Weltmeeren sind bei einem Salzgehalt von durchschnittlich 3,5 Masse-% insgesamt ca. 5×10^{16} t Salz gelöst). Die Hauptionen sind Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ und SO_4^{2-} , in nichtmarinen Evaporiten auch $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$. Die wichtigsten evaporitischen Minerale sind Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), Anhydrit (CaSO_4) und Steinsalz (NaCl). Die K- und Mg-Salze Sylvinit, Carnallit, Polyhalit, Kainit und Kieserit stellen weitere wichtige Bestandteile mariner Salzlagerstätten dar. Es gibt aber auch terrestrische Salzbildungen (Salzausblühungen, Salz-

sümpfe, Salzseen), die ihren Ursprung in Verwitterungslösungen magmatischer, metamorpher und sedimentärer Gesteine haben.

Bedingt durch die unterschiedlichen Löslichkeiten der verschiedenen Salzminerale ergibt sich bei zunehmender Aufkonzentrierung der wässrigen Lösung in marinen Salinarfolgen im Idealfall eine in Tab. 5 dargestellte charakteristische Abfolge von Ausfällungen. Gips fällt erstmalig nach einer Erhöhung der Salzkonzentration des Meerwassers auf das 3,62-fache, Steinsalz (Halit, NaCl) nach einer Erhöhung auf das 10,82-fache aus.

Tab. 5 Eindampfungsabschnitte in marinen Salinarfolgen

Abschnitt	Phase
4	K- und Mg-Chloride und -Sulfate
3	Steinsalz (NaCl)
2	Ca-Sulfate (Gips, Anhydrit)
1	Karbonate

Bedingt durch die Komplexität der Entstehungsbedingungen ist diese „ideale Salzabfolge“ in der Realität allerdings meist gestört. Aus einer 1.000 m mächtigen Wassersäule kann sich durch Eindampfung eine Salzfolge von ca. 16 m Mächtigkeit abscheiden, wobei Steinsalz dominiert (Tab. 6).

Tab. 6 Resultierende Salzmächtigkeiten bei der Eindampfung einer 1.000 m mächtigen Meerwassersäule

Salze	Mächtigkeit [m]
Mg-Sulfate und -Chloride	2,40
K-Sulfate und -Chloride	0,40
Steinsalz (NaCl)	12,40
Ca-Sulfate	0,50
Karbonate	0,05

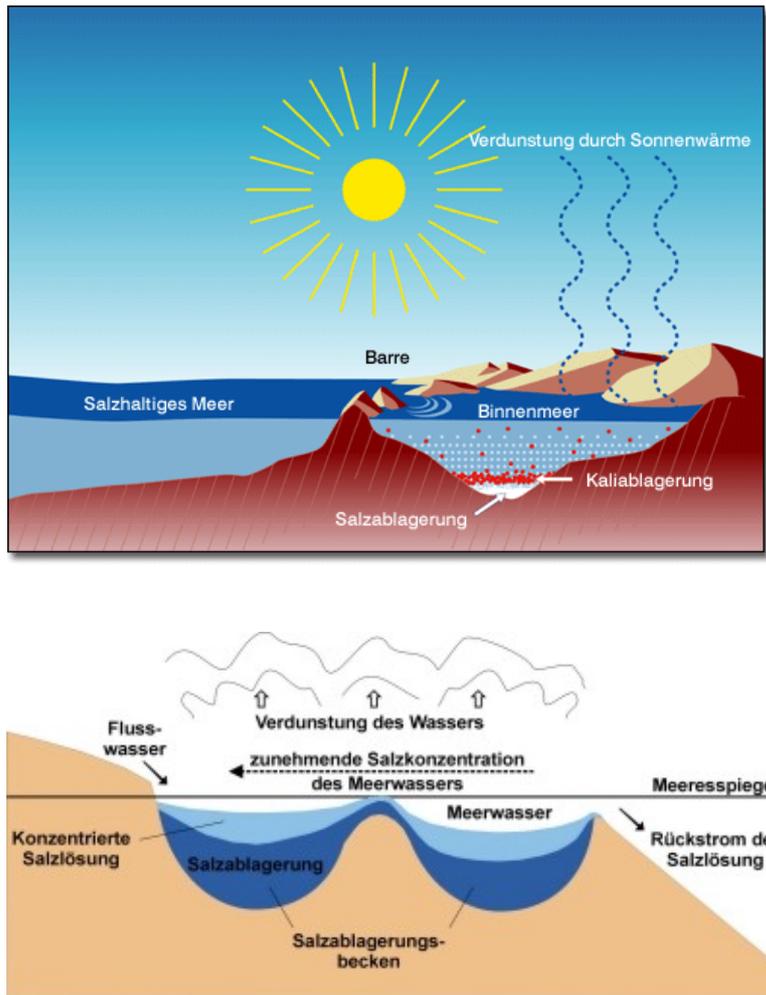


Abb. 5 Zwei schematische Darstellungen der Entstehung von Salzlagerstätten nach der Barren-Theorie von OCHSENIUS (oben: /K+S 07a/, unten: /GNS 07/)

Evaporitvorkommen sind seit dem Erdaltertum (Paläozoikum) in zahlreichen geologischen Formationen entstanden und praktisch weltweit verbreitet. Damit bedeutende Salzlagerstätten entstehen können, muss eine größere Wassermenge ganz oder teilweise vom Meer isoliert werden. Die in Abb. 5 skizzierte Barrentheorie wurde bereits 1877 entwickelt und besitzt auch heute noch generelle Gültigkeit /LUK 02/.

Im Zechstein - vor ca. 250 Millionen Jahren - waren große Teile Mitteleuropas von einem Binnenmeer bedeckt, das vom offenen Ozean durch seichte Meerengen (sogenannte Barren) weitgehend abgetrennt war. Bei heißem und trockenem Klima und aufgrund seiner damaligen geographischen Lage wurde in Mitteleuropa im Zechsteinbecken, das von Ostengland bis Polen reichte, durch Verdunstung von Meerwasser eine bis zu 1.500 m mächtige Salzfolge (Karbonate, Sulfate und Chloride) ausgeschieden.

Diese wurde während der weiteren erdgeschichtlichen Entwicklung durch Ablagerungen der Trias, des Jura und der Kreide überlagert und dadurch meist vor Wiederauflösung geschützt. Die Bildung dieser großen Zechstein-Salzmächtigkeiten lässt sich durch die Aufeinanderfolge unterschiedlicher Sedimentationszyklen auch aus verhältnismäßig flachen Sedimentationsbecken erklären. Insgesamt sind im o. g. Zechsteinbecken sieben Zyklen ausgebildet, von denen vier Hauptsalzyklen (Folgen) von wirtschaftlicher Bedeutung sind (Tab. 7).

Tab. 7 Hauptsalzyklen im mitteleuropäischen Zechsteinbecken

Folge	Bezeichnung
Zechstein 4	Aller-Folge
Zechstein 3	Leine-Folge
Zechstein 2	Staßfurt-Folge
Zechstein 1	Werra-Folge

Tektonische Bewegungen und der Druck auflastender Sedimente führten insbesondere in Norddeutschland zu Salzbewegungen und zum Aufstieg (Halokinese) der aufgrund ihrer geringeren Dichte leichteren Salzgesteine mit der Bildung von Salzkissen und Salzstöcken (Diapiren) (Abb. 6). Die ursprünglich horizontal liegenden Salzschiefer wurden hierbei häufig verstellt, verfaltet, ausgedünnt oder aufgestaut. Der Salzaufstieg verursachte darüber hinaus häufig einen Kontakt von Salzgesteinen mit dem Grundwasser. Im Einflussbereich des Grundwassers werden Salzgesteine teilweise oder vollständig aufgelöst; die unlöslichen bzw. schwerlöslichen Rückstände bilden dann das so genannte Hutgestein, das wiederum das verbleibende Salz vor weiterer Auflösung / Ablaugung schützen kann.

Charakteristische Profildarstellungen für Salinarvorkommen in flacher Lagerung und steiler Lagerung (Diapir, Salzstock) sind in Abb. 7 wiedergegeben.

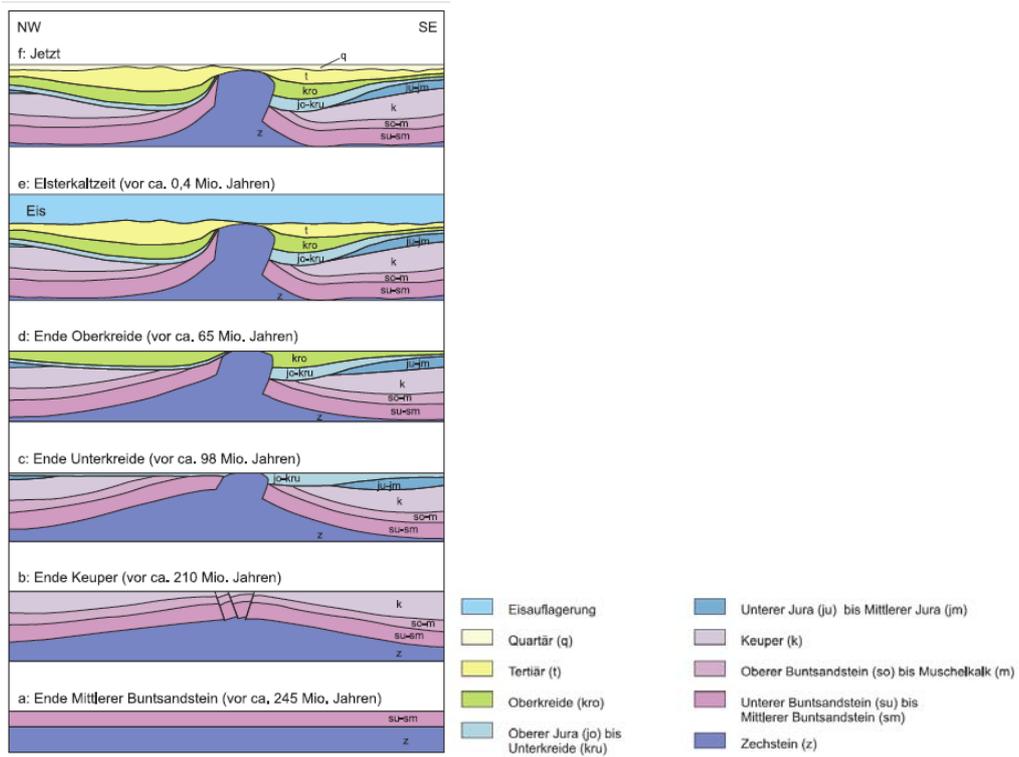


Abb. 6 Entwicklungsschema eines Salzstockes am Beispiel Gorleben /BFS 05b/

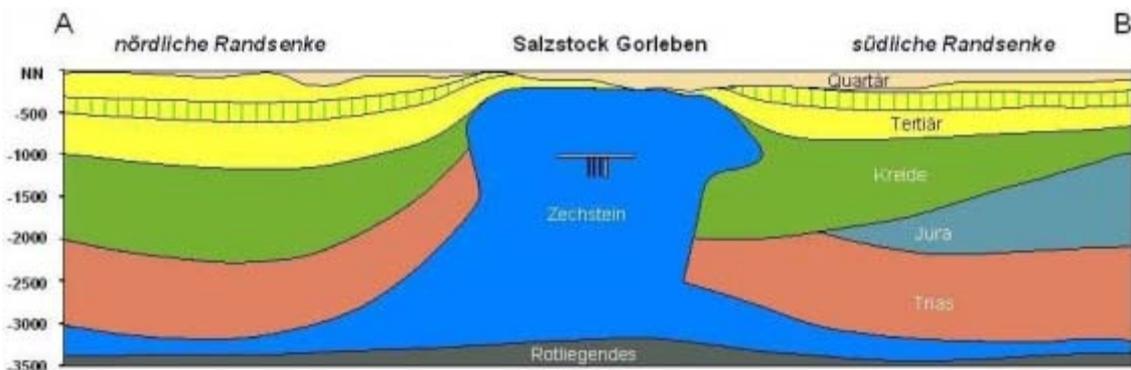
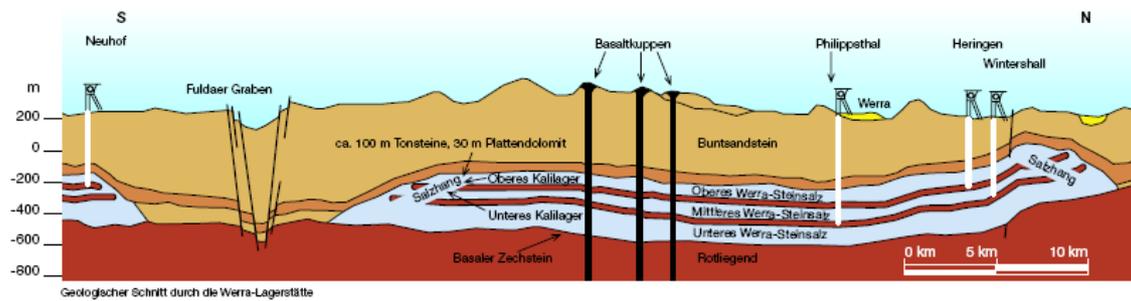


Abb. 7 Geologische Querprofile durch zwei Salinarvorkommen in a) flacher Lagerung (Werra-Lagerstätte, oben /K+S 07b/) und b) steiler Lagerung (Salzstock Gorleben, unten /BGR 07/)

• **Eigenschaften**

Bei der Endlagerung von Abfällen in Salzgesteinen sind die entscheidenden nutzbaren Gesteinseigenschaften:

- Hohe Plastizität, die zu einem schnellen Schließen von Hohlräumen führt
- Niedrige Permeabilität und damit eine nicht vorhandene bzw. nur geringe Wasserwegsamkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit, welche die beim Zerfall von Spaltprodukten entstehende Wärme abführt
- Sehr geringer Wassergehalt.

Die hohe Wasserlöslichkeit und die geringe Dichte stellen demgegenüber negative Eigenschaften dar. Die für Steinsalz charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeiten sind in Tab. 8 mit denen anderer Gesteinstypen verglichen.

Tab. 8 Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten (Bandbreiten und Medianwerte) unterschiedlicher Gesteine in einem für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen relevanten Teufenbereich (ca. 300 - 1.500 m) /AAE 02/

Gesteinstyp	Mittlere Testtiefe u. GOK (m)	Anzahl Messwerte	Gebirgsdurchlässigkeit (kf-Wert in m/s)	
			Bandbreite	Medianwert
Steinsalz	300-841	75	$9,81 \times 10^{-17} - 2,94 \times 10^{-10}$	$5,50 \times 10^{-14}$
Mergelstein	304-1.104	157	$5,00 \times 10^{-14} - 3,00 \times 10^{-05}$	$3,07 \times 10^{-11}$
Ton/Tonstein	313-1.474	36	$5,50 \times 10^{-15} - 2,05 \times 10^{-10}$	$9,50 \times 10^{-13}$
Granit	302-1.480	605	$2,23 \times 10^{-15} - 4,00 \times 10^{-04}$	$2,80 \times 10^{-08}$
Gneis	301-1.498	271	$4,70 \times 10^{-15} - 1,20 \times 10^{-05}$	$3,00 \times 10^{-10}$

• **Vorkommen**

Salzformationen finden sich in Deutschland im Wesentlichen innerhalb einer breiten Zone, die sich von der südlichen Nordsee über die Norddeutsche Tiefebene in Richtung Polen erstreckt (Zechsteinbecken) (s. Abb. 8). Es gibt jedoch auch im mittel- und süddeutschen Raum Salzlagerstätten. Diese wurden überwiegend während des Zech-

steins und des Muschelkalks gebildet und befinden sich auch heute noch in vorwiegend horizontaler Lagerung.

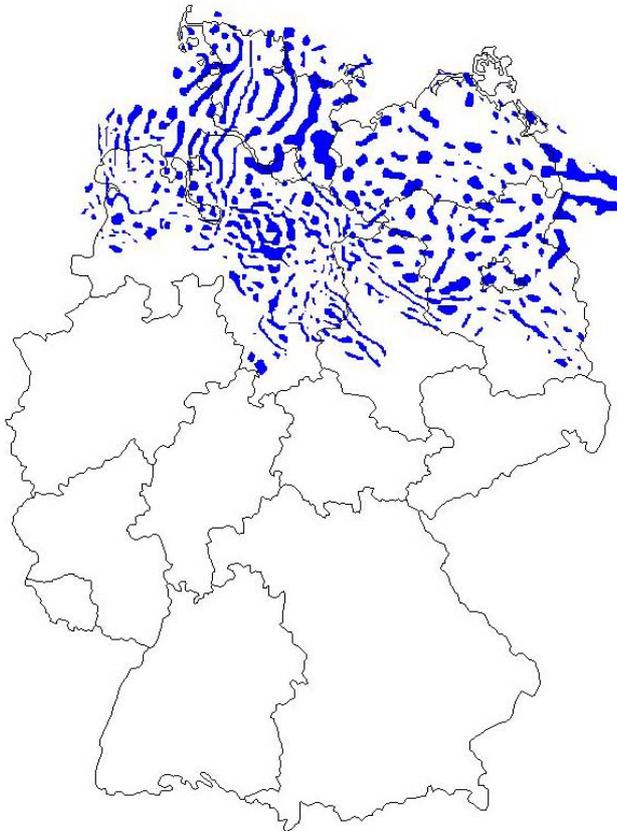


Abb. 8 Verbreitung bedeutender Salzformationen (blau) im norddeutschen Raum (Zeichnung GRS nach einer Vorlage aus /KEL 02/)

- **Nutzung / Bedeutung**

Salzformationen haben insbesondere als Lagerstätte für Steinsalz und Kalisalze (Rohstoff für die chemische Industrie, Streusalz, Lebensmittel, Konservierung) große wirtschaftliche Bedeutung. Evaporithorizonte sind darüber hinaus auch wesentlicher Bestandteil vieler Ölfelder, indem sie das abdichtende Deckgebirge von Speichergesteinen oder im Zusammenhang mit Salzdiapirismus strukturelle Fallen für Kohlenwasserstoffe bilden. Darüber hinaus werden die während des Gewinnungsbergbaus entstandenen Hohlräume in mächtigen Salzlagerstätten als Kavernenspeicher oder auch zur Abfallentsorgung genutzt. Im Einzelnen ergeben sich folgende wichtige Nutzungsgebiete:

- Chemische Industrie (Erzeugung von Soda, Chlor und Natronlauge)
- Düngemittel-Industrie (Kalisalze)
- Wasserenthärtungsanlagen
- Färbereien, Lederindustrie
- Futtermittelindustrie
- Straßenwinterdienst
- Lebensmittelindustrie
- Medizin

Die bei der Bohrlochsolung entstehenden Hohlräume im Salzgestein eignen sich für die Speicherung von Mineralöl und Mineralölprodukten sowie Gasen (Erdgas, Ethylen). Im Jahr 2000 waren in Deutschland 19 Kavernenspeicheranlagen mit insgesamt 140 Einzelkavernen und ca. 6 Mrd. m³ (Vn) Arbeitsgasvolumen in Betrieb.

Aus dem Produktionsbetrieb stammende untertägige Hohlräume im Salzgestein werden in Deutschland auch in verstärktem Maße zur Entsorgung von Abfällen benutzt. Derzeit sind mehrere Untertagedeponien (z. B. Herfa-Neurode, Heilbronn, Zielitz) sowie zahlreiche weitere Anlagen in Betrieb, in denen überwiegend Verbrennungsrückstände als Versatzmaterial eingesetzt werden. Eine zusammenfassende Darstellung über Produktions- und Entsorgungsstandorte (incl. der Schachanlage Asse, des ERAM sowie des in den 1980er und 1990er Jahren auf seine Eignung hin untersuchten Standortes Gorleben) gibt Abb. 9.

2.2.2 Tongesteine

Mengenmäßig dominieren unter den Sedimenten weltweit Tone und Tonsteine mit rund 80 %. Tonsteine sind auch in vielen Ländern Europas sowie in Japan Gegenstand intensiver Untersuchungen in Bezug auf ihre Eignung als Endlagerwirtsgestein.

• Genese und Zusammensetzung

Tonminerale sind überwiegend wasserhaltige Aluminiumsilikate, welche den Hauptbestandteil von Tonen und Tonsteinen darstellen, die im Wesentlichen bei der Verwitte-

ung von Silikatgesteinen entstehen. Im Einzelnen ist ihre Bildung und Umbildung von den jeweiligen natürlichen Reaktionsräumen, so genannten Environments, abhängig:

- Verwitterungsumenvironment
- Sedimentäres Environment
- Diagenetisch-hydrothermales Environment.

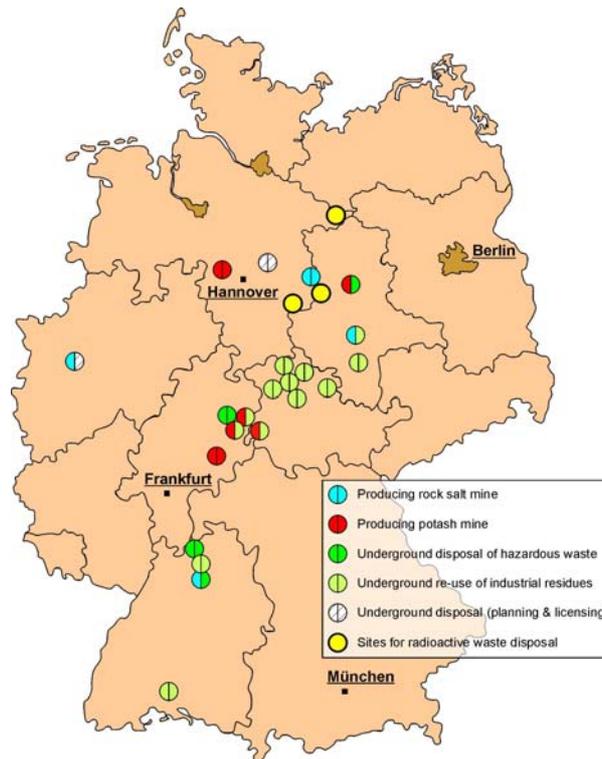


Abb. 9 Salzproduktionsstandorte in Deutschland (blau = Steinsalz, rot = Kalisalz) sowie Anlagen zur untertägigen Entsorgung von Abfällen in Salzgestein (dunkelgrün = Untertagedeponie UTD für gefährliche Abfälle, hellgrün = untertägige Verwertung von industriellen Rückständen, gelb = Standorte im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle; weiß-schraffiert = UTD in Planung oder im Genehmigungsverfahren (Quelle: K+S)

Die Tonmineralbildung in der Verwitterungszone wird bestimmt durch die Wechselwirkung der Gesteine in der obersten kontinentalen Erdkruste mit der Hydrosphäre. Ein sedimentäres Environment entsteht langsam bei sich absenkendem See- bzw. Meeresboden über geologische Zeitspannen in Millionen Jahren. Mit zunehmender Tiefe werden chemische Reaktionen zwischen Sedimenten und Porenlösungen intensiver

und damit die Voraussetzungen für eine Tonmineralneubildung und -umbildung im diagenetischen Environment immer günstiger.

Tone enthalten Verwitterungsreste und Mineralneubildungen. Unter Tonen i.e.S. werden unverfestigte Sedimente verstanden. Sie bestehen im Wesentlichen aus Mineralpartikeln (insbesondere blättchenförmigen silikatischen Tonmineralen) mit einem Durchmesser < 2 µm. Altersmäßig gehören unverfestigte Tone fast vollständig jüngeren erdgeschichtlichen Systemen (Tertiär, Quartär) an.

Tab. 9 Beispiele von Tonmineralen

Bezeichnung	Schichtanzahl	Chem. Summenformel
Kaolinit	Zweischicht-Tonmineral	$Al_4[(OH)_8/Si_4O_{10}]$
Montmorillonit	Dreischicht-Tonmineral	$Al_4[(Si_4O_{10})_2(OH)_4] \times H_2O$
Chlorit	Vierschicht-Tonmineral	$(Fe,Mg,Al)_6[(OH)_8/Si,Al)_4O_{10}]$

Tonige Sedimentgesteine liegen jedoch überwiegend in verfestigtem Zustand vor. Diese verfestigten Tongesteine wurden als Schiefertone (Ton mit primär angelegter schiefriger Textur), Tonschiefer (diagenetisch stärker verfestigt) und werden nach neuerer Nomenklatur als Tonsteine bezeichnet. Sie gehören überwiegend älteren geologischen Systemen des Mesozoikums und Paläozoikums an. Fast alle Tonsteine sind umgelagert und zeigen eine Schichtung.

In der Lagerstättenkunde wird zwischen Kaolinen, Kaolinittonen, gemeinen Tonen und Bentoniten unterschieden. Der Bauplan der silikatischen Tonminerale ist recht einfach. Bausteine sind $[SiO_4]$ -Tetraeder und $[Me(O,OH)_6]$ -Oktaeder (Me = Metallion). Die Tetraeder sind über gemeinsame Sauerstoffionen zu Schichten verknüpft. In der Ebene sind die Tetraeder zu einem Netzwerk aus Sechseringen verbunden. Zweischichttonminerale bestehen aus einer Abfolge von einer Tetraeder- und einer Oktaederschicht, Dreischichttonminerale bestehen aus einer Abfolge von einer Tetraeder-, einer Oktaeder- und einer Tetraederschicht (O = Sauerstoff-Ion, OH = Hydroxid-Ion, Al = Aluminium-Ion, Si = Silizium-Ion, Fe = Eisen-Ion, Mg = Magnesium-Ion). Si kann durch Al und Al durch Fe oder Mg ersetzt sein. Dadurch erhalten Dreischichttonminerale eine negative Ladung, die sie durch die Anlagerung von Kationen in ihre Zwischenschichten ausgleichen (siehe Abb. 10) /BOD 07/.

- **Eigenschaften**

Charakteristisch für Tone ist ihre geringe Korngröße, die bei Smektiten bis weit unter 2 µm herab reicht. Kaoline sind demgegenüber gröber. Der Mineralbestand von Tonen ändert sich mit der Teilchengröße, d. h. eine feinteilige Fraktion hat eine andere Zusammensetzung als eine gröberteilige. Auf Grund der kleinen Teilchendurchmesser kann die spezifische Oberfläche von Tonmineralen bis zu mehreren hundert m²/g betragen (z. B. Montmorillonit bis zu 800 m²/g).

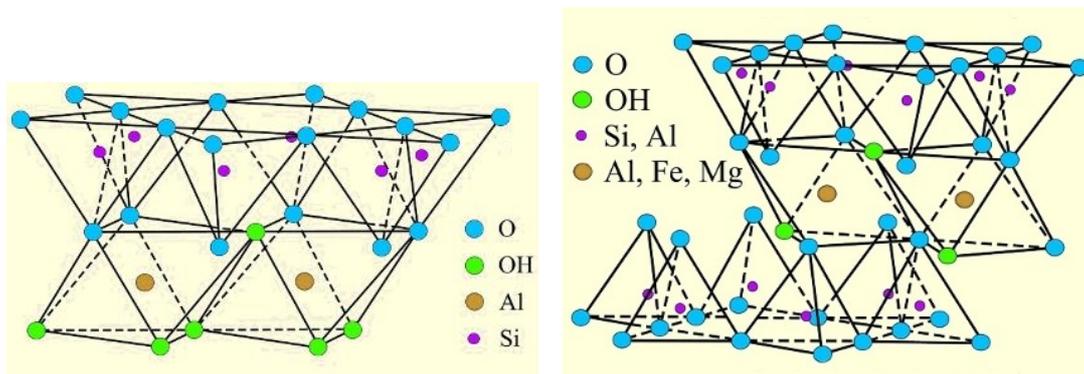


Abb. 10 Strukturmodelle eines (links) 2-Schicht-Tonminerals (wie z. B. Kaolinit) und (rechts) 3-Schicht-Tonminerals (z. B. Muskovit) - (/BOD 07/ nach Vorlagen des US Geological Survey)

Die typischen Eigenschaften der Tone (Konsistenz, Wasserbindevermögen, Quellvermögen, hohe Adsorptionskapazität gegenüber anorganischen und organischen Stoffen, Abdichtungsvermögen, nicht-Newton'sches Fließverhalten, Thixotropie, Plastizität) werden entscheidend durch die silikatischen Tonminerale beeinflusst. Eine weitere charakteristische Eigenschaft der Tonminerale ist ihr Kationenaustauschvermögen. Die Höhe des Kationenaustauschvermögens wird durch die Menge der Zwischenschichtkationen bestimmt, deren Anzahl (pro Formeleinheit) durch die Schichtladung festgelegt und vom pH-Wert unabhängig ist.

Wesentlich für das besondere bodenmechanische Verhalten der Tone sind neben der geringen Korngröße die blättchenförmige Gestalt und die Ladung der Tonmineralteilchen. Die Flächen der Tonminerale sind negativ, die Kanten positiv oder negativ geladen. Zum Ausgleich der Flächenladung werden Kationen angelagert. Auch die Plastizität der Tone hängt weitgehend von der Anziehung und Abstoßung der Tonmineralteilchen ab. Bei plastischer Verformung werden Tonmineralteilchen gegeneinander verschoben, bei nachlassendem Druck aber sofort wieder durch die gegenseitige Anzie-

hung und Abstoßung in ihrer Lage fixiert. Die Plastizität eines Tones ändert sich mit den austauschbaren Kationen und der Elektrolytkonzentration der Porenlösung. Dabei wird zwischen intrakristallin nicht quellfähigen Tonmineralen, wie Kaolinit und Illit, sowie intrakristallin quellfähigen Tonmineralen, vor allem Montmorillonit, unterschieden /JAS 93/, /PAR 98/.

Quellverhalten der Tone

Die Quellfähigkeit der Tone beruht auf der Schichtstruktur der Tonminerale, ihrer Ladung und den zum Ladungsausgleich angelagerten Kationen. Dabei lassen sich zwei Abschnitte der Quellens beobachten. Ausgehend von trockenem Ton wird Wasser zunächst durch die Hydratation der austauschbaren Kationen aufgenommen (erster Abschnitt = intrakristallines Quellen). Der zweite Abschnitt des Quellens beruht auf dem großen Unterschied der Ionenkonzentration, vor allem der Kationenkonzentration, an der Tonmineraloberfläche und in der Porenlösung (osmotische Quellung). Wesentlich ist hier die Feststellung, dass das Quellverhalten der Tone durch Kationenaustausch verändert wird, wie das auch bei anderen bodenmechanischen Eigenschaften der Tone, wie der Plastizität und dem Scherverhalten, zu beobachten ist. Beim Quellen der Tone handelt es sich um einen ausgesprochen reversiblen Vorgang.

Bei der Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen in Tongesteinen sind vor allem thermische Einflüsse von Bedeutung, da Reaktionen auftreten können, die zu kristallchemischen Veränderungen führen. Die entscheidenden Eigenschaften von Ton als Wirtsgestein und Barriere sind:

- Hohe Plastizität bei niedrigem Diageneseegrad
- Große Quellfähigkeit durch Wasseraufnahme
- Geringe Wasserwegsamkeit
- Hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide, aber auch
- Schlechte Wärmeleitfähigkeit.

Bei der Verwendung von Tonen, insbesondere aber von Bentonit als technische Barriere, werden folgende besondere Fähigkeiten der Tone genutzt:

- Sperrwirkung gegen wässrige Lösungen infolge starker Quellung
- Korrosionsbremse im Abfallbehälter

- Erhöhung des Fixiervermögens für spezifische Radionuklide bei diagenetischen oder metamorphen Mineralneubildungen
- Sorptionsvermögen für Anionen und Kationen.

- **Vorkommen**

Tone und Tonsteine sind weltweit und auch in Deutschland weit verbreitet. Tone und Tonsteine, die vorwiegend aus dem Paläozoikum und Mesozoikum stammen, treten vor allem in Mittel- und Süddeutschland auf. In Norddeutschland finden sich mesozoische, tertiäre und quartäre Tonsteine bzw. Tone, beispielsweise im Deckgebirge der Salzlagerstätten. Tonformationen mit großflächiger Verbreitung sind aus dem Norddeutschen Becken, dem Nordalpinen Molassebecken, der angrenzenden Schwäbisch/Fränkischen Alb und dem Oberrheingraben bekannt.

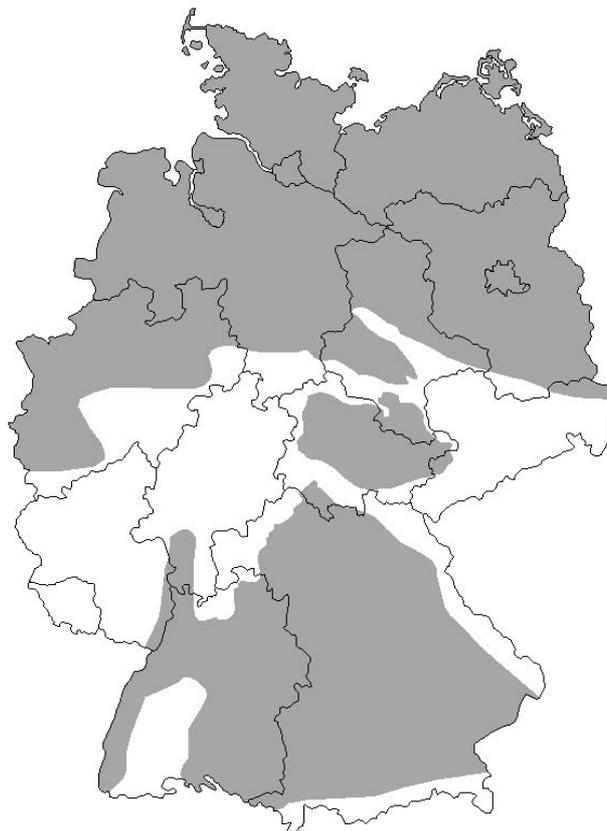


Abb. 11 Verbreitung bedeutender Tonformationen (grau) in der Bundesrepublik Deutschland (Zeichnung GRS nach einer Vorlage in /KEL 02/)

Die Basis zur Beurteilung der Eignung von Tonformationen bildet eine regionale Analyse aller mächtigen tonigen Gesteinsformationen hinsichtlich ihrer Verbreitung, Mächtig-

keit, Tiefenlage, Fazies, Diagenese, tektonischen und hydrogeologischen Bedingungen sowie ihrer mineralogischen, geochemischen und petrophysikalischen Eigenschaften (siehe Abb. 11).

- **Nutzung / Bedeutung**

Tone und bindige Böden werden seit alters her für Abdichtzwecke verwendet. Im Wasserbau ist besonders die Verwendung von Bentonit verbreitet. Tone und Tonminerale als besonders resistente Rückstände der Gesteinsverwitterung eignen sich auch als Dichtungsmaterial gegenüber anthropogenen Verwitterungslösungen, wie Deponiesickerwässern. Tone bilden auch natürliche Barriersysteme im Untergrund von Deponien. Technische Verwendung finden sie in folgenden Bereichen:

- Ionentauscher, z. B. zur Säuberung von Trinkwasser und zum Entfärben von Lösungen
- Grundstoff der Keramikindustrie (Kaolinit)
- Rohstoff für die Zementherstellung
- Papierindustrie
- Isolierender Baustoff (Blähtone)
- Abdichtung in Deponien, Bohrungen
- Füll- und Zuschlagstoffe in Farben und pharmazeutischen Produkten
- Katalysatoren.

Tonige Gesteine insgesamt (Tonsteine im engeren Sinne, aber auch Mergelsteine, die aus Kalk und Ton bestehen) besitzen vor allem wegen ihrer geringen bis sehr geringen Permeabilität bzw. entsprechend niedrigem Durchlässigkeitsbeiwert, der für sie typischen Plastizität, ihrer chemischen Pufferwirkung und ihrer Rückhaltekapazität für Radionuklide günstige Barriereigenschaften.

2.2.3 Sonstige Sedimentgesteine (Tuff)

- **Genese und Zusammensetzung**

Tuffstein¹ gehört zu den pyroklastischen Gesteinen und stellt ein verfestigtes vulkanisches Auswurfprodukt mit verschiedensten Korngrößen und mineralogischer Zusammensetzung dar. Weitere Unterscheidungen werden entweder auf Grundlage des Chemismus vorgenommen (in Analogie zu den vergleichbaren Vulkaniten), z. B. Andesittuff, Basalttuff oder auf Grundlage der Entstehung, wie z. B. Aschentuff (Tuff aus vulkanischen Aschen) oder Glastuff (Tuff aus Bruchstücken vulkanischer Gläser).

- **Eigenschaften**

Die wichtigsten Eigenschaften von Tuffstein sind in Form wichtiger technischer Kenn-
daten in Tab. 10 zusammengefasst.

Tab. 10 Technische Kenndaten von Tuffstein /GEO 07b/

Rohdichte	1,8 - 2,0 g/cm ³
Wasseraufnahme	6,0 - 15,0 Gew.-%
Druckfestigkeit	20 - 30 N/mm ²
Biegezugfestigkeit	2 - 6 N/mm ²

- **Vorkommen**

Tuffsteine kommen in der Bundesrepublik Deutschland nur in lokal stark begrenzten Vorkommen vor, insbesondere in den jüngeren Vulkangebieten der Eifel, aber auch in Sachsen und dem Sauerland.

- **Nutzung / Bedeutung**

Tuffstein ist ein relativ weiches Gestein, das sich gut verarbeiten lässt. Aufgrund seiner durch Gaseinschlüsse hervorgerufenen isolierenden Eigenschaft wird er überwiegend als Baumaterial verwendet. Wirtschaftlich spielt er aber mit einer (2003) verwerteten Menge von rund 10.000 t (zum Vergleich: Steinsalz ca. 16 Mio. t, Bentonit 500.000 t)

¹ Die eindeutige Einordnung der Tuffe in die Liste der Gesteinsarten ist schwierig. Wegen ihres vulkanischen Ursprungs werden sie häufig zu den Vulkaniten bzw. den Magmatiten gezählt. Die durch ihre Ablagerung einsetzende Sedimentation rechtfertigt jedoch die Einordnung als Sedimentgestein.

eine nur untergeordnete Rolle. Aufgrund der geringen Verbreitung und des Vorkommens in jüngeren Vulkangebieten wird eine Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland ausgeschlossen. In den USA wird am Standort Yucca Mountain Tuffstein als Endlager-Wirtsgestein genutzt.

2.3 Magmatische Gesteine

Grundsätzlich eignen sich auch Magmatite als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle. Dies sind im Wesentlichen Granite und Basalte /WIT 79/, auf die in den nachfolgenden Abschnitten näher eingegangen wird.

- **Genese und Zusammensetzung**

Magmatische Gesteine entstehen durch Kristallisation von Mineralen bei der Abkühlung eines Magmas. Magmen sind natürliche Gesteinsschmelzen, die in größeren Tiefen der Erdkruste bzw. im Erdmantel bei Temperaturen von mehr als 650°C entstehen und in der Regel eine feste und eine fluide Phase enthalten.

Je nach Ort und Geschwindigkeit der Magmenerstarrung, die von verschiedenen Parametern, wie der Temperatur, dem Dichteunterschied zwischen Magma und umgebendem Gestein, dem Fluidgehalt und der Viskosität abhängen, werden generell zwei Gruppen magmatischer Gesteine unterschieden:

- a) Plutonite (Tiefengesteine, Intrusivgesteine), wie z. B. Granit, entstehen aus langsam abkühlenden Gesteinsschmelzen, die in größerer Tiefe (einige 100 m bis Zehner km-Bereich) stecken geblieben sind. Charakteristisch sind große Kristalle, die als Folge der allmählichen Abkühlung des Magmas sehr langsam gewachsen sind. Tiefengesteinskörper werden als Plutone bezeichnet, weisen sehr verschiedenartige äußere Formen auf und erreichen Dimensionen von mehreren Kilometern Ausdehnung.
- b) Vulkanite (Ergussgesteine, Effusivgesteine), wie z. B. Basalt, bilden sich bei der Förderung von Magmen an die Erdoberfläche. Aufgrund ihrer schnellen Abkühlung und Erstarrung ist eine feinkörnige oder glasige Matrix charakteristisch.

Bisweilen werden auch so genannte Subvulkanite als gesonderte Gruppe ausgewiesen. Diese relativ oberflächennah erstarrten und deswegen meist feinkörnigen Gesteine füllen beispielsweise ehemalige Klüfte und Spalten in oberflächennahen Gesteinskomplexen oder treten als Schlotfüllungen und Stöcke auf.

Nach Art der Förderung werden Vulkanite auch in Ergussgesteine (Laven) und pyroklastische Gesteine unterschieden. Laven (und zugehörige subvulkanische Gesteine) entstehen durch Verfestigung des an der Erdoberfläche austretenden oder in geringer Tiefe erstarrenden Magmas. Pyroklastische Gesteine (z. B. Tuffe) entstehen durch explosive vulkanische Aktivitäten und anschließende Sedimentation der dabei gefördert Lockermaterialien, wie z. B. Schmelzpartikel, Bruchstücke älterer magmatischer Gesteine oder des durchdrungenen Nebengesteins. Diese Gesteinsart wird deshalb im Kapitel Sedimentgesteine näher behandelt.

Je nach SiO₂-Gehalt werden vier Magmenbereiche unterschieden, in denen jeweils Tiefengesteine oder Ergussgesteine ausgebildet sein können (Tab. 11).

Tab. 11 Magmenbereiche und deren wichtigste Gesteinsvertreter

Magmenbereich	SiO ₂ -Gehalt [%]	Plutonit (Tiefengestein)	Vulkanit (Ergussgestein)
Sauer	> 66	Granit	Rhyolith
Intermediär	52 - 66	Syenit, Diorit	Trachyt, Andesit
Basisch	45 - 52	Gabbro	Basalt , Diabas
Ultrabasisch	< 45	Peridotit	Pikrit

Magmatische Gesteine bestehen überwiegend aus Silikaten; wichtige magmatische Minerale sind Quarz, Feldspat, Glimmer, Pyroxene, Amphibole und Olivin. Eine nähere Klassifikation magmatischer Gesteine erfolgt entweder anhand der jeweiligen Mineralanteile in einem so genannten „Streckeisen-Diagramm“ (mit den wesentlichen Komponenten Quarz, Alkalifeldspat, Plagioklas und Feldspatvertreter [Foide] - Abb. 12) oder - bei zu geringen Korngrößen (wie häufig bei feinkörnigen oder glasigen Vulkaniten) - auf Grundlage ihrer chemischen Zusammensetzung, wie z. B. mit Hilfe eines TAS-Diagrammes (Total Alkali vs. Silica), in welchem der Na₂O + K₂O-Gehalt in Y-Richtung gegen den SiO₂-Gehalt in X-Richtung aufgetragen wird.

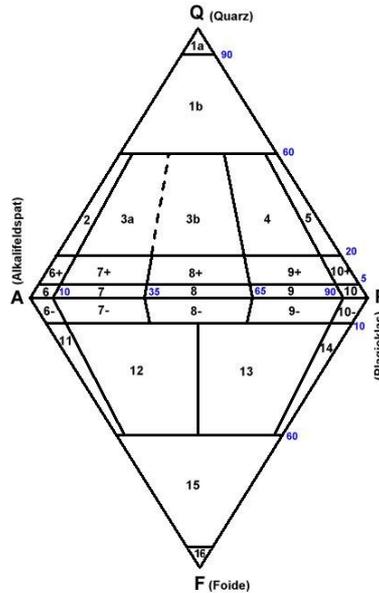


Abb. 12 Mineralogische Beschreibung von magmatischen Gesteinen nach Streckeisen - QAPF (Quarz, Alkalifeldspat, Plagioklas, Foide) /MIN 07a/. Bezogen auf die in diesem Kapitel behandelten Gesteinsarten repräsentiert Feld 3 die Zusammensetzung von Granit, Feld 10 die von Basalt

2.3.1 Granit

- **Genese und Zusammensetzung**

Granit ist mit etwa 44 Vol. % der wichtigste Vertreter intrusiver magmatischer Gesteine innerhalb der kontinentalen Erdkruste. Granitische Gesteinsschmelzen entstehen i. A. durch teilweise Aufschmelzung wasserreicher Krustengesteine (Anatexis) im Bereich von Subduktionszonen (unter Atmosphärendruck schmilzt Granit bei 960°C; bei zunehmendem Wasserdruck erniedrigt sich die Schmelztemperatur auf ca. 650°C). Die eigentliche Intrusion der meist zähflüssigen granitischen Schmelzen in Bereiche der oberen Erdkruste erfolgt bevorzugt entlang tektonischer Verwerfungen oder Schwächezonen. Im Bereich der oberen Erdkruste (aber noch in Tiefen von mehreren Kilometern) erstarrt die Schmelze langsam, wobei die Geschwindigkeit der Abkühlung sich in den Korngrößen des erstarrten Gesteins widerspiegelt (langsame Abkühlung = große Kristalle [bis zu mehrere cm], schnellere Abkühlung = kleine Kristalle).

Die in die Erdkruste intrudierten Magmenkörper können Ausdehnungen bis zu mehreren 100 km Länge und Breite sowie eine bis zu 100.000 km² große Aufschlussfläche

erreichen (Batholithe, Plutone). In Mitteleuropa erreichen die Granit-Batholithe der böhmischen Masse ca. 3.000 km² Ausdehnung. Im Zuge weiterer tektonischer Bewegungen (Gebirgsbildungsprozesse) kann der erstarrte Granit an die Erdoberfläche gelangen und ist dann dort der - unter warm-humidem Klima bis mehrere 100 m tief reichenden - Verwitterung ausgesetzt.

Granite stellen so genannte saure (= SiO₂-reiche), leukokrate (helle), massige, vollkristalline (i. A. mittel- bis grobkörnige) Gesteine dar, die hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten und mafischen (Mg-Fe-Silikate) Mineralen (insb. Glimmer) bestehen. Die Zusammensetzung und Schwankungsbreite der Hauptgemengteile sind in Tab. 12 zusammengefasst.

Tab. 12 Hauptgemengteile eines Granits

Mineral		Anteil [%]
Feldspäte	Alkalifeldspat	30 - 65
	Plagioklas	< 30
Quarz		15 - 40
Mafische Minerale	Glimmer (Biotit, Muskovit)	10

- **Eigenschaften**

Wichtige technische Kennwerte von Granit sind in Tab. 13 zusammengestellt. Ein besonderes Charakteristikum von Granitkomplexen ist deren Zerlegung in Blöcke durch ein typisches orthogonales Kluftnetz. Da die nahezu wasserundurchlässige Gesteinsmatrix praktisch nur einen diffusiven Wassertransport erlaubt, sind in Bezug auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle letztlich die Größe dieser einzelnen Blöcke und die hydraulische Wirksamkeit des Kluftnetzes von entscheidender Bedeutung.

Tab. 13 Technische Kennwerte eines Granits /GEO 07b/

Parameter	Wertebereich
Rohdichte	2,6 - 2,8 g/cm ³
Wasseraufnahme	0,2 - 0,5 Gew.-%
Druckfestigkeit	160 - 240 N/mm ²
Biegezugfestigkeit	10 - 20 N/mm ²



Abb. 13 Aufschluss eines Granits mit ausgeprägtem Kluftsystem (Lokation: Velky rybnik, Tschechische Republik); Länge des Maßstabs: 1 m

- **Vorkommen**

Ausgedehnte Granit-Formationen größerer Ausdehnung sind in der Bundesrepublik Deutschland selten. Vorkommen finden sich beispielsweise im Bayerischen Wald, Erzgebirge, Fichtelgebirge, Harz, in der Lausitz, im Odenwald, Oberpfälzer Wald, Schwarzwald, Thüringer Wald (siehe Abb. 14). Im Gegensatz zu Deutschland besitzen Schweden, Finnland und auch Kanada große, auch an der Oberfläche aufgeschlossene, zusammenhängende Kristallinvorkommen.

- **Nutzung / Bedeutung**

Granite haben aufgrund ihrer Härte und Festigkeit sowie ihrer guten Schleif- und Polierbarkeit insbesondere eine große wirtschaftliche Bedeutung im Bauwesen. Verwendung finden sie beispielsweise im Straßenbau und Bahnbau als Pflasterstein, Bordstein und Schotter, im Hochbau als Außenwandbekleidung, Bodenbelag, im Innenausbau sowie im Gartenbau.

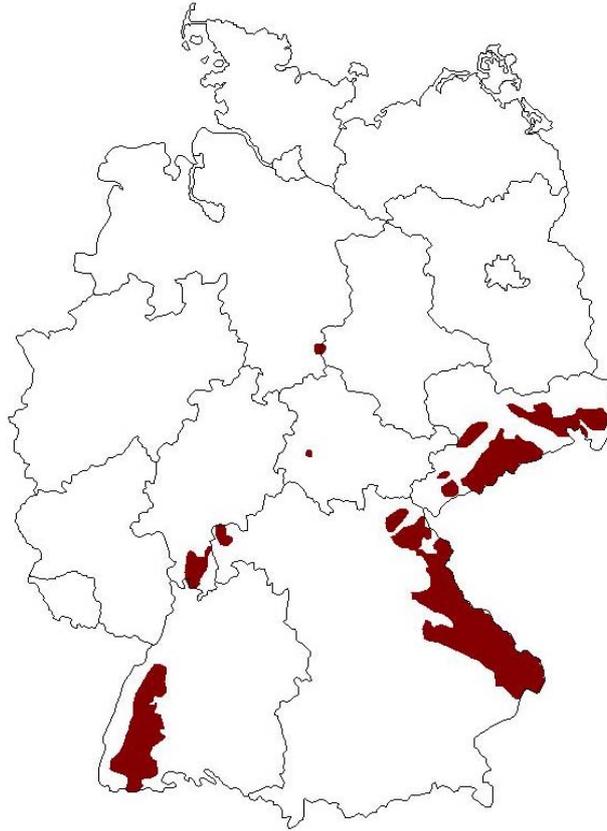


Abb. 14 Verbreitung bedeutender Kristallin-Vorkommen (Plutonite und metamorphe Gesteine) in der Bundesrepublik Deutschland (Zeichnung GRS nach einer Vorlage aus /KEL 02/)

2.3.2 Sonstige magmatische Gesteine (Basalt)

- **Genese und Zusammensetzung**

Bei Basalt handelt es sich um ein relativ kieselsäure- (SiO_2 -) armes, basisches, meist dunkelgraues bis schwarzes vulkanisches Ergussgestein (extrusives magmatisches Gestein). Der Mineralbestand wird von einer Mischung aus Plagioklas und Eisen- sowie Magnesiumsilikaten (Pyroxene, häufig auch Olivin) dominiert, Alkalifeldspäte und Quarz fehlen oder treten nur untergeordnet auf (siehe Abb. 12, Feld 10). Basaltische Gesteine werden im Wesentlichen in zwei Gesteinstypen unterschieden, die sich vor allem im SiO_2 -Gehalt und im Verhältnis Alkalien : SiO_2 unterscheiden: Tholeiitbasalt und Alkalibasalt. Bei seinem Austreten an der Oberfläche ist basaltisches Magma etwa 1.000°C heiß. Aufgrund der raschen Abkühlung weist dieses Gestein in der Regel eine

feinkörnige bis glasige Matrix auf. Bei verzögerter Abkühlung bilden sich charakteristische (bevorzugt sechseckige) Basaltsäulen (Abb. 15).



Abb. 15 Basaltvorkommen am Scheibenberg (Erzgebirge) /GEO 07a/

Basaltische Gesteine haben vielfältige Ursprungsquellen. Hauptentstehungsorte sind die mittelozeanischen Rücken, an denen emporsteigende Lava erkaltet und fortlaufend neuen Ozeanboden bildet, aber auch die Subduktionszonen an der Grenze aufeinander treffender Kontinentalplatten. Darüber hinaus spielen kontinentale Plateaubasalte (mächtige Deckenergüsse innerhalb stabiler Kontinentalregionen) eine bedeutende Rolle. Basaltvorkommen auf dem Festland sind oft an tektonische Schwächezonen, wie etwa Grabenbrüche und so genannte „Hot Spots“ (Zentren vulkanischer Aktivität, die nicht direkt durch plattentektonische Prozesse verursacht werden) gebunden.

- **Eigenschaften**

Die wesentlichen technischen Kennwerte von Basalt sind in Tab. 14 zusammengestellt.

Tab. 14 Technische Kennwerte eines Basaltes /GEO 07b/

Parameter	Wertebereich
Rohdichte	2,9 - 3,0 g/cm ³
Wasseraufnahme	0,1 - 0,3 Gew. %
Druckfestigkeit	250 - 400 N/mm ²
Biegezugfestigkeit	15 - 25 N/mm ²

- **Vorkommen**

Die ozeanische Kruste wird insgesamt zu großen Teilen aus Ozeanbodenbasalten aufgebaut. Bekannte kontinentale Plateaubasalte sind beispielsweise die Columbia River Basalte in den USA, die eine Fläche von etwa 174.000 km² einnehmen und ein Volumen von rund 100.000 km³ aufweisen. Der Dekkan-Plateaubasalt bedeckt mit einem Volumen von 1,5 Mio. km³ in Indien eine Fläche von rund 520.000 km² /FUB 08/.

Basalt-Formationen größerer Ausdehnung sind in der Bundesrepublik Deutschland selten. Vorkommen finden sich beispielsweise in der Oberpfalz, dem Fichtelgebirge, der Schwäbischen Alb, der Rhön, dem Vogelsberg, dem Kaiserstuhl und der Eifel.

- **Nutzung / Bedeutung**

Als Baustoff findet Basalt aufgrund seines druckfesten, schwer zu bearbeitenden, aber nicht zu spröden Charakters hauptsächlich für den Unterbau von Straßen und Bahngleisen Verwendung. Bis in die 1960er Jahre wurde Basalt auch als Mosaik-, Klein- und Großpflaster im Wege- und Straßenbau verarbeitet. Der größte Teil der heutigen Förderung wird für den Tief- und Straßenbau und als Schotter für den Gleisbau eingesetzt; darüber hinaus findet Basalt auch im Garten- und Landschaftsbau Verwendung.

3 **Barriereeigenschaften der Wirtsgesteine**

Die unterschiedlichen, nachfolgend detaillierter vorgestellten Gesteine weisen jeweils spezifische Eigenschaften auf, die im Rahmen der Endlagerkonzepte genutzt werden, um das Erreichen und die Einhaltung der Schutzziele zu gewährleisten.

3.1 **Mögliche Barriereeigenschaften**

Die möglichen Barriereeigenschaften eines Wirtsgesteins ergeben sich aus dessen Art, Zusammensetzung, Größe, Lage sowie der daraus resultierenden geologisch-hydrogeologisch-hydrochemischen Gesamtsituation.

Als **geologische Barriere** im engeren Sinne ist das Wirtsgestein entscheidend für die Einschlussqualität und die Langzeitstabilität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Für die Endlagerung wichtige Eigenschaften des Wirtsgesteins sind:

- Tiefenlage
- Räumliche Ausdehnung
- Erkundbarkeit
- Permeabilität
- Selbstheilungsfähigkeit
- Homogenität.

Die hydraulischen und geochemischen Verhältnisse in einem Wirtsgestein können den Einschluss bzw. die Rückhaltung der radioaktiven Stoffe verbessern und unterstützen und damit als hydrogeologisch-geochemische Barriere wirken. Wichtige Eigenschaften hierbei sind:

- Hydraulische Durchlässigkeit
- Kationenmobilität
- Puffereffekte.

Wirtsgesteinstypische Eigenschaften können sich auch auf die geotechnischen Barrieren eines Endlagers auswirken, da diese auf das Wirtsgestein abgestimmt werden und

vom Wirtsgestein beeinflusst werden können. Die wichtigsten Eigenschaften in diesem Zusammenhang sind:

- Korrosionseigenschaften
- Beständigkeit gegenüber thermischen Einwirkungen
- Standfestigkeit von Hohlräumen.

Die vorstehend aufgeführten, für die Endlagerung relevanten Eigenschaften werden nachfolgend näher erläutert.

• **Tiefenlage**

Die optimale Tiefenlage eines Wirtsgesteins liegt zwischen ca. 300 m und 1.500 m. Sie ergibt sich einerseits aus Schutzüberlegungen (z. B. Mächtigkeit von Wirtsgestein und Überlagerung, Schutz vor Einwirkungen von der Erdoberfläche aus) und andererseits aus Praktikabilitäts Gesichtspunkten (zunehmender technischer Aufwand mit zunehmender Tiefe eines Endlagerbergwerkes, Auswirkungen der geothermischen Tiefenstufe). Deutliche Unterschreitungen der o. g. Tiefenlage sind mit sicherheitsrelevanten Nachteilen, wesentliche Überschreitungen mit technischen Nachteilen verbunden.

Salzstöcke weisen aufgrund ihrer Entstehung durch Diapirismus oft geeignete Wirtsgesteinsbereiche in der optimalen Tiefenlage für ein Endlager auf. Bei flachen Salzlagern ist dagegen oft nur ein Salzhorizont ausgebildet, der eine begrenzte Mächtigkeit aufweist und - bei horizontaler Lagerung - auch nur in einer definierten Tiefe auftritt. Bei einer geneigten Lagerung, wie dies z. B. am Standort des Endlagers WIPP (USA) der Fall ist, ist die optimale Tiefenlage nur in einem mehr oder weniger engen räumlichen Bereich gegeben. Die Auswahlmöglichkeiten zur Platzierung eines Endlagers sind dann entsprechend eingeschränkt.

Unkonsolidierte Tone (z. B. in Mol/Belgien) treten meist oberflächennah und oberhalb der optimalen Tiefenlage auf, was sich nachteilig auf ihre Eignung als Wirtsgestein auswirkt. Hoch verdichtete und konsolidierte Tonsteine können demgegenüber in unterschiedlichen Tiefen vorliegen. In beiden Fällen kann das Einfallen der Schichten den nutzbaren Bereich in der optimalen Tiefenlage eingrenzen.

Granitvorkommen erstrecken sich meist über größere Tiefenbereiche, so dass die Platzierung eines Endlagers in optimaler Tiefenlage i. d. R. möglich ist.

- **Räumliche Ausdehnung**

Für den Einschluss radioaktiver Abfälle sind möglichst ausgedehnte Wirtsgesteinsformationen günstig, da deren Barriereigenschaften dann in einem großen Bereich wirksam sein können. Die genauen Abmessungen hängen von verschiedenen Wirtsgesteinsparametern, wie z. B. der hydraulischen Durchlässigkeit oder der Wärmeleitfähigkeit, am Standort ab.

Salzstöcke weisen i. d. R. eine große Ausdehnung auf, da bei der Bildung des Salzstockes eine starke Salzakkumulation erfolgt. Der Salzaufstieg kann aber auch zu einer Verfaltung der Salzsichten mit einer Beeinträchtigung deren Homogenität führen.

Im Gegensatz zu Salzstöcken ist bei flach gelagerten Salzformationen ein Akkumulationseffekt durch Salzaufstieg nicht gegeben. Ausdehnung und Mächtigkeit solcher Salzformationen können deshalb stark variieren und hängen von der Ablagerungsgeschichte und den nachträglich einwirkenden geologischen Prozessen ab.

Tonablagerungen variieren in ihrer vertikalen Mächtigkeit beträchtlich. Sowohl der plastische Boom-Ton in Belgien als auch der stärker konsolidierte Opalinuston im Raum Benken (Nordschweiz) liegen in einer Mächtigkeit von ca. 100 m vor. Deutlich geringere Mächtigkeiten können ein Ausschlusskriterium darstellen, größere Mächtigkeiten treten selten auf.

Granitvorkommen haben oft eine große räumliche Ausdehnung von mehreren Kubikkilometern. Einschränkungen bezüglich ihrer Endlager-Eignung ergeben sich in erster Linie aus strukturellen Gegebenheiten (z. B. Klüfte, Störungen). Die reine Ausdehnung hat bei kristallinen Gesteinen daher nur einen geringeren Aussagewert für ihre Eignung.

- **Erkundbarkeit**

Eine gute Erkundbarkeit des Wirtsgesteins ist bei flach gelagerten Salzablagerungen gegeben, da sie meist eine einfache Struktur aufweisen (Ablagerung der Schichten entsprechend ihrer Ausfällung bei zunehmender Aufkonzentrierung des Meerwassers). Diese einfache Schichtung kann zwar durch verschiedene Vorgänge während des Verdunstungsprozesses oder durch Einwirkung von Druck und Temperatur gestört

sein, die resultierenden Strukturen sind aber mit den heute verfügbaren Erkundungsmethoden gut erkennbar.

Die Erkundung von Salzstöcken gestaltet sich schwieriger, da bei diesen verschiedene Salzhorizonte teilweise kleinräumig und intensiv verfaltet vorliegen (Steinsalz im Wechsel mit z. B. Anhydrit, Kalisalzen). Mittels einzelner Bohrungen sind solche komplexen Strukturen nur ungenügend aufklärbar. Sie bedürfen vielmehr einer Kombination verschiedener Erkundungsverfahren.

Gering konsolidierte Tone mit hoher Plastizität sind mittels Bohrungen und geophysikalischer Methoden gut erkundbar, da sie eine begrenzte Variabilität in Mächtigkeit und Zusammensetzung aufweisen. Bei einer untertägigen Erkundung können allerdings aufwändige Stabilisierungsmaßnahmen erforderlich werden.

Der Erkundung von Granit durch Bohrungen sind insbesondere hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften des Gebirges relativ enge Grenzen gesetzt, da diese Eigenschaften in Abhängigkeit von Kluftdichte und -weite stark variieren. Die Anwendung geophysikalischer Methoden ist ergänzend, aber nur mit begrenzter Auflösung möglich.

- **Permeabilität**

Für die Endlagerung geeignete Salzgesteine weisen eine äußerst geringe Permeabilität für Gase auf. Dies stellt einerseits einen Sicherheitsvorteil dar (Einschluss des radioaktiven ^{14}C -Anteils in Abfällen). Andererseits erfordert diese Eigenschaft, die mögliche Gasbildung und -freisetzung aus Abfällen und Verpackungsmaterialien in sehr eng definierten Grenzen zu halten.

Die Permeabilität von Tonen für Gase ist geringfügig höher als bei Steinsalz. Eine Limitierung der Gasbildung und -freisetzung ist aber auch bei diesem Wirtsgesteinstyp erforderlich.

Bei Granit ergeben sich aufgrund dessen höherer Durchlässigkeit für Wasser ein größeres Lösungspotenzial für Gase und damit auch höhere zulässige Gasbildungs- und Gasfreisetzungsmengen. Darüber hinaus erfolgt ein Gasfluss in Klüften mittels einer Zwei-Phasen-Strömung. Falls die Einhaltung der radiologischen Schutzziele eine hohe Korrosionsbeständigkeit der Endlagerbehälter (z. B. Kupfer) erfordert, muss das Gasbildungspotenzial entsprechend verringert werden.

- **Selbsteilungsfähigkeit**

Die Kriechfähigkeit von Steinsalz und die dadurch bedingte rasche Konvergenz von Hohlräumen führt in diesem Wirtsgestein zur schnellen Schließung von Kammern, Strecken, aber auch von Klüften und Rissen. Die Geschwindigkeit dieses Vorgangs ist sowohl von der Teufenlage als auch vom Mineralbestand sowie der Schichtung in der Umgebung des Hohlraums abhängig. Im optimalen Tiefenbereich und homogenen Steinsalz ist das Selbstheilungsvermögen gut ausgeprägt.

Bei Tonen, aber auch bei Tonstein ist ebenfalls eine ausgeprägte Selbstheilungsfähigkeit nachgewiesen.

Bei Granit ist ein gewisses Selbstheilungsvermögen nur durch Ausfällungen oder den Eintrag von sedimentierendem Material in den Hohlraum gegeben. Die Selbstheilung verläuft aber deutlich langsamer und weniger vollständig als bei Salz oder Ton. Eine Reduzierung der hydraulischen Durchlässigkeit bis auf den ursprünglichen Wert des Wirtsgesteins kann bei Granit jedoch nicht erreicht werden.

- **Homogenität**

Die Homogenität des Wirtsgesteins kann bei Salzstöcken aufgrund von Verfaltungsvorgängen im Zuge des Diapirismus deutlich geringer als bei flach gelagerten Salzablagerungen sein. Bei letzteren sind allerdings auch Einschränkungen der Homogenität durch die weiter oben beschriebenen Phänomene möglich.

Tone können von ihrer Genese her immer Inhomogenitäten aufweisen (z. B. Sandlinsen, Salzeinschlüsse). Plastische Tone sind gegenüber postgenetischen Veränderungen (z. B. Eindringen anderer Gesteine, Ausweichen bei Druckunterschieden) anfälliger als Tonstein. Sie neigen aber in geringerem Maß zur Bildung von Klüften.

Die Homogenität von Granit ist sehr standortabhängig. Einschränkungen der Homogenität mit Auswirkung auf die Eignung als Endlagerformation ergeben sich aus folgenden Punkten:

- Häufig liegen größere Störungen vor, so dass bei gegebenem Platzbedarf für das Endlager und bei Einhaltung eines Sicherheitsabstandes zu solchen Störungen die Eignung als Wirtsgestein eingeschränkt sein kann
- Kluftdichte und -ausrichtung variieren oft sehr stark.

- **Hydraulische Durchlässigkeit**

Die hydraulische Durchlässigkeit von Salzgestein ist außerordentlich gering, was einen praktisch vollständigen Einschluss von Schadstoffen über lange Zeiträume ermöglicht. Eine gewisse Schadstoffmobilität wird für Lösungseinschlüsse im Salzgestein postuliert, wenn sie Temperaturdifferenzen ausgesetzt werden. Ein Transport kontaminierter Lösungen aus dem Salzstock heraus ist damit jedoch nicht verbunden.

Tone weisen i. d. R. ebenfalls eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit auf, die in relativ engen Grenzen variieren kann. Die Bewegung von Wasser ist auf den diffusiven Transport beschränkt, der aber typischerweise nur sehr niedrige Geschwindigkeiten erreicht (z. B. einige 10 m im Laufe von einer Million Jahren). Wenig konsolidierte Tone unterscheiden sich im Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit kaum von stärker konsolidierten Tonsteinen, weisen aber um ein bis zwei Größenordnungen höhere Diffusionsgeschwindigkeiten für Wasser auf.

Granit selbst ist nahezu undurchlässig. Die hydraulische Durchlässigkeit wird ausschließlich durch Klüfte im Gestein verursacht. Die Kluftdichte hydraulisch miteinander verbundener Klüften variiert in vielen Fällen auch kleinräumig. Da sich in Klufftgrundwasserleitern eine nennenswerte effektive Durchlässigkeit des Gebirges ergeben kann, sind beim Wirtsgestein Granit i. d. R. ergänzende technische Barrieren erforderlich.

- **Kationenmobilität**

Die Kationenmobilität in Salzgesteinen ist wesentlich von der sehr niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit geprägt und infolgedessen sehr niedrig. Szenarien im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse, die beispielsweise Lösungseinschlüsse im Salz oder einen Wasserzutritt einschließen, zeigen, dass das Wirtsgestein selbst kaum eine Schadstoff-Rückhaltung bewirkt. Eine Sorption gelöster Schadstoffe im Steinsalz oder einem Salzversatz findet praktisch nicht statt.

Bei Tonen und Tonstein ist eine sehr hohe Sorption von Kationen typisch. Die Sorption ist äußerst wirksam und für viele Kationen nahezu irreversibel. Allerdings können manche Tone aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte nennenswerte Anteile an Humin- und Fulvinsäuren enthalten, so dass in diesen Tongesteinen auch entsprechende Kolloide mit Durchmessern weit unter 1 µm gebildet werden können. Von der Mobilität dieser Kolloide hängt es letztlich ab, ob eine Schadstoffmobilität resultiert. Aufgrund der generell niedrigen Mobilität von Lösungen und der niedrigen Diffusionsgeschwindigkeit in Tongestein wirkt sich dieser Effekt aus heutiger Sicht nicht einschränkend für die Eigenschaft des Wirtsgesteins aus.

Die Kationenmobilität bei Granit ist einerseits von der Chemie der Grundwässer abhängig, andererseits von der Sorption an Kluftoberflächen. Im Vergleich zu anderen Gesteinen (z. B. Tonstein) ist die Fähigkeit zur Sorption in Klüften für einige Kationen zwar nachweisbar vorhanden, aber vergleichsweise gering ausgeprägt.

- **Puffereffekte**

Puffereffekte spielen bei Lösungen in Salz praktisch keine Rolle. Weder der pH-Wert noch der Eh-Wert werden mangels entsprechender Potenziale nennenswert gepuffert. Einen sehr geringen Effekt können biologische Aktivitäten haben, da speziell an die Verhältnisse im Salz angepasste Mikroorganismen aktiv werden können. Deren Stoffumsätze sind aber gering, so dass nicht generell reduzierende Bedingungen erreicht werden. Bei Salz stehen Umlösungsvorgänge (Auflösung leichter löslicher Bestandteile bei gleichzeitigem Abscheiden geringer löslicher Salze) bei den Szenarien mit einem Lösungszutritt im Vordergrund, einen wesentlichen Einfluss auf den pH- und Eh-Wert hat dies nicht.

Die chemischen Verhältnisse in Tongesteinen sind generell reduzierend, was einer Bildung oxidierter Spezies bestimmter Radionuklide (wie z. B. ^{99}Tc , ^{238}U) entgegensteht und dadurch deren Mobilität verringert. Tongesteine weisen ferner aufgrund ihres chemischen Aufbaus sowie eines geringen Calcit-Gehalts pH-puffernde Eigenschaften auf, so dass Tone technisch oft zur Stabilisierung des pH-Werts eingesetzt werden.

Bei Granit spielen Puffereffekte nur eine vergleichsweise geringe Rolle, da das entsprechende Potenzial kaum wirksam werden kann. Wichtig sind die oft in Klüften vorhandenen organischen Bestandteile, die durch die Aktivitäten von ubiquitär vorhandenen Mikroorganismen zu einer Verringerung von Rest-Sauerstoff beitragen können.

Auch Calcit-Ausfällungen in Klüften können für die chemischen Verhältnisse eine wichtige Rolle spielen. Diese Effekte treten aber nicht generell bei Granit auf und werden daher hier nicht als typische Eigenschaft dieses Wirtsgesteins eingeordnet.

- **Korrosionseigenschaften**

Lösungen in Salzgesteinen sind vor allem wegen ihres Chloridgehalts hochkorrosiv. Diese Wirkung wird insbesondere durch erhöhte Temperaturen (wärmeentwickelnde Abfälle) und durch Gammabestrahlung aus Behältern für hochradioaktive Abfälle (Bildung von Natrium-, Chlor- und Sauerstoff-Radikalen) noch verstärkt. Die Anforderung z. B. einer garantierten Standzeit von Behältern ist für dieses chemische Milieu schwierig zu erfüllen, so dass bezüglich des Einschlusses ausschließlich auf die Kriechfähigkeit des Salzes und die resultierende Hohlraumkonvergenz abgehoben wird, damit Lösungen nicht in Kontakt mit Behältermaterialien kommen können. Aus Art und Zusammensetzung von Lösungen resultieren bei der Endlagerung in Salz ferner besondere Anforderungen an die Eignung von Materialien für Verschlussbauwerke.

Bei Tonen liegt Wasser weitgehend an die Tonmatrix gebunden vor. Der Chloridgehalt von Tonen kann relativ hoch sein, wenn die Sedimentation in salzhaltiger Umgebung (z. B. im Ozean) erfolgte. Die Beweglichkeit dieser Chloridionen ist jedoch auf Diffusion und damit auf sehr kurze Distanzen beschränkt. Aufgrund der generell reduzierenden Eigenschaften der Tonmatrix sind korrosive Verhältnisse ausgeschlossen.

Bei Granit können in endlagerrelevanten Teufen saline Grundwässer angetroffen werden. Der Mineralisierungsgrad und die Zusammensetzung von angetroffenen und zu erwartenden Lösungen sind bei diesem Wirtsgestein generell ein wichtiges Auswahlkriterium. Wenn das Sicherheitskonzept zentral auf den Einschluss in Behältern und auf deren Korrosionsbeständigkeit abstellt (z. B. Schweden), ist der Chloridanteil im Kluftwasser eine bedeutende Größe.

- **Beständigkeit gegenüber thermischen Einwirkungen**

Steinsalz weist eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf, was die Wärmeabfuhr aus dem Endlagerbereich begünstigt und thermisch induzierte Spannungen im Gebirge begrenzt. Steinsalz verhält sich bei thermischen Einwirkungen inert und kann daher ohne irreversible Schäden Temperaturen von bis zu 200°C am Kontakt zwischen Endlagerbehälter und Wirtsgestein ausgesetzt werden. Es ist allerdings ein ausreichender Sicherheitsabstand zu Bereichen mit Salzen erforderlich, die bei thermischen Einwirkungen mit

Änderungen der Struktur oder Zusammensetzung reagieren (z. B. Carnallit und andere wasserhaltige Salzminerale). Die notwendigen Sicherheitsabstände (ca. 50 bis 100 m) können bei Salzstöcken wegen der teils intensiven Verfallung zu einer komplexen Endlager-Auslegung führen.

Tone sind thermisch sensibel. Im unmittelbaren Endlagerbereich sind Temperaturen unter 100°C einzuhalten, da oberhalb dieser Temperatur irreversible Strukturänderungen der Tonmatrix auftreten können. Dies erfordert größere Abstände zwischen den einzulagernden Endlagerbehältern bzw. einen höheren Flächen- bzw. Raumbedarf als bei anderen Wirtsgesteinen. Im weiteren Umfeld des Endlagers ist zu beachten, dass die Wärmeleitfähigkeit von Ton aufgrund der Schichtung von Mikrostrukturen anisotrop, d. h. richtungsabhängig ausgeprägt ist (thermische Anisotropie), was sich auf die thermisch induzierten Spannungen im Gebirge im Laufe der ersten 500 Jahre nach der Einlagerung auswirkt. Gering konsolidierte Tone sind dabei sensibler als Tonstein, da Tonstein im Laufe seiner Konsolidierungsgeschichte bereits höheren Drücken und Temperaturen ausgesetzt war und daher weniger empfindlich reagiert.

Granit und andere magmatische Gesteine weisen eine mittlere Wärmeleitfähigkeit auf und reagieren auf direkten Kontakt zu Wärmequellen wenig wärmeempfindlich. Wegen der geringen Elastizität sind bei solchen Wirtsgesteinen die thermisch ausgelösten Spannungen im Nahbereich und die Beeinflussung der Kluffleitfähigkeit relevant, so dass ebenfalls eine sorgfältige thermische Begrenzung der Belastungen erfolgen muss. Die Endlagerkonzepte sehen daher durchgängig die Verwendung von Puffermaterialien vor, die den direkten Kontakt zwischen Endlagergebäude und Wirtsgestein vermeiden und für eine bessere Verteilung der Wärmeeinwirkung sorgen.

- **Standfestigkeit von Hohlräumen**

Die Standfestigkeit von untertägigen Hohlräumen ist bei Salzgestein weitgehend gegeben. Bei langen Betriebsdauern von mehreren Jahrzehnten können durch die Konvergenz allerdings Auflockerungen, wie z. B. Abschaltungen auftreten, denen durch Gegenmaßnahmen wie Nachschnitt der Hohlraumwandung oder Setzen von Ankern entgegengewirkt werden kann. Zur Vorbeugung gegen solche Auflockerungen ist eine konzeptionelle Minimierung der jeweils offenen Hohlräume erforderlich. Langfristig schließen sich die Hohlräume in Salz vollständig. Bei flach gelagerten Salzablagerungen ist die Konvergenz im Allgemeinen ausgeprägter als bei Salzstöcken.

Hohlräume in Tonstein sind bei ausreichender Verfestigung eigenständig stabil. Bei gering konsolidierten Tonen sind bei der Erstellung und beim Offenhalten von Hohlräumen umfangreiche Stütz- und Ausbaumaßnahmen gegen den Gebirgsdruck erforderlich. Entsprechende Nachweise, dass unter diesen Umständen die Standsicherheit gewährleistet werden kann, stehen in den Ländern, die Endlagerkonzepte im Ton verfolgen, noch aus.

Hohlräume in Granit sind ohne weitere Ausbaumaßnahmen ohne Einschränkung sowohl kurz- als auch langfristig stabil erstellbar. Aufgrund der hydraulischen Durchlässigkeit des Gebirges können während der Betriebsphase Maßnahmen zur Sammlung und Führung anfallender Wässer erforderlich werden, eine Beeinträchtigung der Standfestigkeit ergibt sich daraus jedoch nicht.

3.2 Salzgesteine

Die wichtigsten Barriereigenschaften von Steinsalz als Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle sind:

- Niedrige Permeabilität
- Ausgeprägte Kriechfähigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Hohe Standfestigkeit erstellter Hohlräume
- Extrem niedriger Wassergehalt.

Nachteilig können sich dagegen folgende Eigenschaften auswirken:

- Stoffliche Inhomogenität der Salzformationen
- Hohe Wasserlöslichkeit
- Auftreten hochsalinärer Lösungen (hohe Korrosivität, schwierige geochemische Modellierung der induzierten Prozesse)
- Geringes Sorptionsvermögen.

3.2.1 Prinzip der Abfallisolierung

Steinsalz ist ein elasto-viskoplastisches Material, das sich unter Last bruchlos durch Kriechen verformen kann. Aufgrund dieses Materialverhaltens werden Abfälle, die in Hohlräumen im Steinsalz eingelagert werden, mit zunehmender Zeit vollständig eingeschlossen. Die Aufheizung des Gebirges durch wärmeerzeugende Abfälle beschleunigt diesen Vorgang.

Nach dem in den vergangenen ca. 30 Jahren verfolgten Einlagerungskonzept werden verglaste Abfälle (aus der Wiederaufarbeitung) in Stahlkokillen von der Einlagerungssohle des Endlagerbergwerkes (in ca. 800 m Teufe) aus in 300 bis 600 m tiefe vertikale Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 0,6 m /BFS 90/ eingelagert (Abb. 16). Bis zu ca. 200 Behälter werden so in einem Bohrloch untergebracht. Um den Stapeldruck der Behältersäule in das Salzgebirge abzuleiten, wird der Ringspalt zwischen Behältern und Bohrlochwand mit Salzgrus verfüllt. Die Behälter werden vom kriechenden Salz sehr schnell und vollständig eingeschlossen. Am oberen Ende werden die befüllten Bohrlöcher mit einem Stopfen aus Salzgrus verschlossen.

Zusätzlich wurde in Deutschland ein Konzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten Brennelementen entwickelt /HAR 89/. Danach sollen abschirmende Pollux-Behälter in ca. 200 m lange Strecken mit einer Breite von 4,5 m und einer Höhe von 3,5 m eingelagert werden. Nach der Einlagerung der Pollux-Behälter wird der verbleibende offene Hohlraum in der Strecke mit Salzgrus versetzt (Abb. 17). Durch die Hohlraumkonvergenz wird der eingebrachte Salzgrus kompaktiert, so dass die Behälter vollständig eingeschlossen werden. Auch bei diesem Konzept der Streckenlagerung ist - wie bei der Bohrlochlagerung - eine zusätzliche Abdichtung des Abfalls durch weiteres Puffer-Material nicht erforderlich.

Neben der ausschließlichen Bohrlochlagerung verglaster HAW-Abfälle und der reinen Streckenlagerung abgebrannter Brennelemente in Pollux-Behältern wurde in Deutschland auch die kombinierte Strecken- und Bohrlochlagerung beider Abfallarten als Einlagerungskonzept entwickelt /PAE 89/.

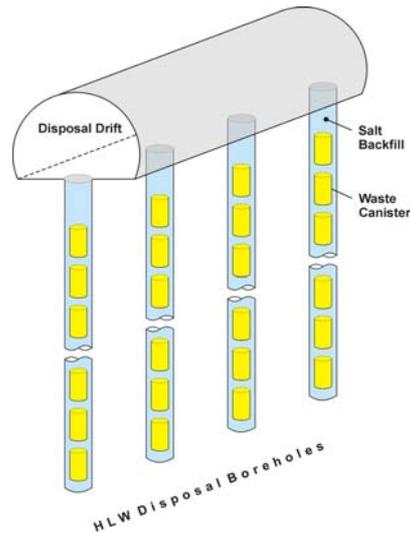


Abb. 16 Konzept der Bohrlochlagerung von HAW-Behältern in ca. 300 - 600 m tiefen Bohrlöchern von einer Einlagerungsstrecke aus

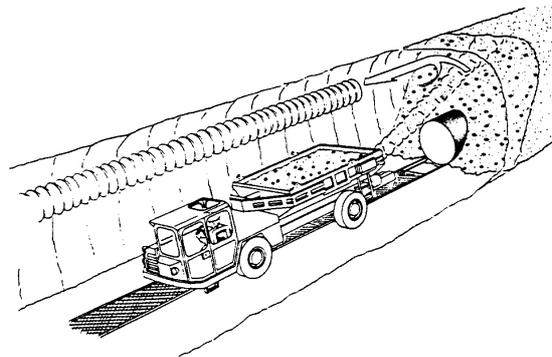


Abb. 17 Konzept der Streckenlagerung von Polluxbehältern mit anschließendem Verfüllen der Strecken mit Salzgrus (Quelle: DBE)

- **Geologie**

Aufgaben der geowissenschaftlichen Erkundung einer Salzformation im Hinblick auf deren Eignung als Endlagerwirtsgestein sind die Klärung der geologischen, tektonischen und hydrogeologischen Randbedingungen sowie die Feststellung des Stoffbestandes und der Bildungsbedingungen der Salzlagerstätte. Aus der Kenntnis des aktuellen sowie des ursprünglichen Stoffbestandes lassen sich Veränderungen ableiten, die in der geologischen Vergangenheit stattgefunden haben. Das Ausmaß stofflicher Veränderungen hängt wesentlich mit früheren Wasserwegsamkeiten innerhalb der Salzformation zusammen. Der Wert solcher Informationen für die Beurteilung der Barrierewirkung des Wirtsgesteins liegt darin, dass aus den Befunden über die bisherige Entwicklung Hinweise auf mögliche Vorgänge in der Zukunft abgeleitet werden können.

Die Zechstein-Salzformationen, die in Nord- und Mitteldeutschland als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver und toxischer Abfälle ins Auge gefasst werden, gehören zu den marinen Evaporiten, die vor ca. 250 Millionen Jahren im Oberen Perm aus dem Meerwasser ausgeschieden wurden.

Das Mittlere und Obere Perm in Polen, Deutschland und im Nordseebereich sind durch die Bildung von zwei großräumigen Meeresbecken (Nördliches und Südliches Zechstein-Becken) gekennzeichnet. Durch die Verbindung des arktischen Meeres mit den beiden Permbecken kam es zur Bildung des Zechsteinmeeres, das sich mit einer Länge von ca. 1.600 km von Polen bis nach England und einer Breite von rund 600 km von Dänemark bis Süddeutschland erstreckte (Abb. 18). Riftbewegungen in der arktisch-nordatlantischen Region und eustatische Meeresspiegelschwankungen führten zur Ausscheidung der bis zu 1.500 m mächtigen Zechsteinsalz-Formationen.

Die stratigraphische Untergliederung der Salinarfolgen in Nord- und Mitteleuropa basiert auf der Gliederung Richter-Bernburgs /RIC 55/, von dem vier Serien (heute als „Folgen“ bezeichnet) - "Zeitabschnitte äquivalenter Sedimentogenese" - unterschieden wurden: Werra-Folge (Z1), Staßfurt-Folge (Z2), Leine-Folge (Z3) und Aller-Folge (Z4). Ergänzt wurde diese Gliederung durch weitere, lokal begrenzte Folgen im Hangenden des Z4: Ohre-Folge (Z5) /REI 70/, Friesland-Folge (Z6) /KÄD 78/ und Fulda-Folge /MIN 08/. Die Staßfurt-, Leine- und Aller-Folgen bilden die Hauptsalinarfolgen im Norddeutschen Becken.

Die Minerale und Gesteine der Zechsteinsalinarfolgen wurden bei fortschreitender Wasserverdunstung aus dem Meerwasser in der Reihenfolge zunehmender Löslichkeit ausgeschieden. Die Gesteinsabfolge Ca-Karbonat (Kalk, diagenetisch Dolomit) - Gips (diagenetisch Anhydrit) - Steinsalz - K-Mg-Minerale (Carnallit, Sylvit, Kainit) - Bischofit stellt eine progressive Ausscheidung bei zunehmender Salzkonzentration im Meerwasser dar. Werden die konzentrierten Salzlösungen durch den Nachfluss von neuem Meerwasser verdünnt, bilden sich in einer rezessiven Phase Evaporite in umgekehrter Reihenfolge. Entsprechend des Ausmaßes der Verdünnung können bei rezessiven Phasen auch einzelne Gesteinsabfolgen übersprungen werden. In den Zechstein-Folgen, die salinaren Ausscheidungszyklen entsprechen, sind progressive und rezessive Phasen zusammengefasst. Abb. 19 zeigt eine Übersicht der Zechsteinsalinarfolgen im Nordwestdeutschen Raum.

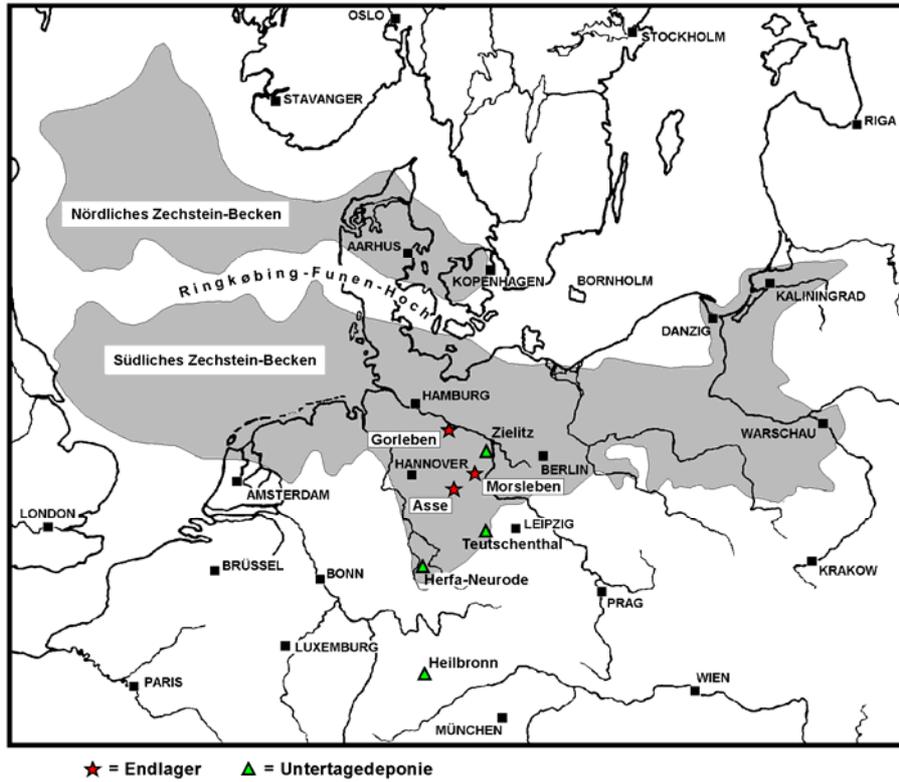


Abb. 18 Paläogeographie der Salinarfazies im Zechstein (nach /ZIE 82/ mit Standorten von Endlagern und Untertagedeponien in Deutschland)

System	Numerisches Alter in Mio a.	Lithostratigraphie				
		Gruppe	Folge	Untergliederung	Symbol	Sed. Steinsalzmächtigkeit
PERM	251	ZECHSTEIN	7	Oberer Müll-Steinsalz	A7r	35 m
				Müll-Steinsalz	Na7	
				Müll-Ton	T7	
			6	Friesland-Steinsalz	Na6	20 m
				Friesland-Anhydrit	A6	
				Friesland-Ton	T6	
			5	Oberer Chre-Ton	T5	30 m
				Grenz-anhydrit	A5r	
				Chre-Steinsalz	Na5	
				Lagenanhydrit	A5	
				Salzbrockenton	T5	
			4	Aller-Steinsalz	Na4	100 m
				Pegmatitanhydrit	A4	
				Roter Salzton	T4	
			3	Leine-Steinsalz mit Kalifloz Ronnenberg (K3R) und Riedel (K3R)	Na3	150 m
				Hauptanhydrit	A3	
				Plattendolomit	Ca3	
				Grauer Salzton	T3	
			2	Stäfurt-Steinsalz mit Kalifloz Stäfurt (K2)	Na2	>500 m
				Basalanhydrit	A2	
Hauptdolomit	Ca2					
Oberer Werra-Anhydrit	A1r					
Oberer Werra-Ton	T1r					
1	Werra-Steinsalz	Na1	nur lokal, in West-Niedersachsen örtl. >200 m			
	Werra-Anhydrit	A1				
	Zechsteinkalk	Ca1				
	Kupferschiefer	T1				
	258			Zechstein-Konglomerat	C1	

Abb. 19 Die Zechsteinsalinarfolgen in Nordwestdeutschland /GEO 04/

- **Mineralogie**

In den Salzlagerstätten sind ca. 50 Haupt- und Nebenminerale nachgewiesen. Übersichten finden sich z. B. bei /KÜH 59/, /BRA 62/, /SON 84/ und /MÜL 88/. Die wichtigsten Salzminerale sind in Tab. 15 zusammengefasst. Die gesteinsbildenden Minerale geplanter Endlagerhorizonte sowie von Kaliflözen sind durch Fettdruck hervorgehoben.

Tab. 15 Wichtige Minerale der Zechsteinevaporite

Bezeichnung	Chem. Formel	Bezeichnung	Chem. Formel
Anhydrit (a)	CaSO₄	Langbeinit (lg)	K ₂ Mg ₂ (SO ₄) ₃
Bischofit (bi)	MgCl ₂ • 6 H ₂ O	Leonit (le)	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ • 4 H ₂ O
Blödit (bl)	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ • 4 H ₂ O	Leonhardtit (lh)	MgSO ₄ • 4 H ₂ O
Calcit (ca)	CaCO ₃	Löweit (loe)	Na ₁₂ Mg ₇ (SO ₄) ₁₃ • 15 H ₂ O
Carnallit (c)	KMgCl₃ • 6 H₂O	Magnesit (m)	MgCO ₃
D'Ansit (da)	Na ₂₁ MgCl ₃ (SO ₄) ₁₀	Polyhalit (p)	K₂MgCa₂(SO₄)₄ • 2 H₂O
Dolomit (d)	CaMg(CO ₃) ₂	Pentahydrit (5h)	MgSO ₄ • 5 H ₂ O
Epsomit (e)	MgSO ₄ • 7 H ₂ O	Pentasalz (ps)	K ₂ Ca ₅ (SO ₄) ₆ • H ₂ O
Gips (g)	CaSO ₄ • 2 H ₂ O	Schönit (sh)	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ • 6 H ₂ O
Glaserit (gs)	K ₃ Na(SO ₄) ₂	Sylvin (sy)	KCl
Glauberit (gb)	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	Syngenit (sg)	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ • H ₂ O
Halit (hl)	NaCl	Thenardit (th)	Na ₂ SO ₄
Hexahydrit (hx)	MgSO ₄ • 6 H ₂ O	Tachyhydrit (ta)	CaMg ₂ Cl ₆ • 12 H ₂ O
Kainit (k)	KMgClSO ₄ • 3 H ₂ O	Vanthoffit (vh)	Na ₆ Mg(SO ₄) ₄
Kieserit (ks)	MgSO ₄ • H ₂ O		

Einige Gesteine der marinen Evaporite sind annähernd monomineralisch zusammengesetzt, z. B. Steinsalz und Anhydrit, andere - wie die Kalisalze - bestehen aus charakteristischen Mineralparagenesen wie Carnallit, Sylvinit oder Hartsalz (bergmännische Bezeichnung für Salzgesteine, die im Allgemeinen härter als Steinsalz (Halit) sind; Hartsalze bestehen etwa zu 65% aus Steinsalz sowie zu etwa 15% aus Sylvinit und wechselnden Anteilen von Kieserit beziehungsweise Anhydrit).

Endlager sollen in möglichst reinen Steinsalzhorizonten eingerichtet werden. Infolge ihrer großen Mächtigkeiten kommen dafür hauptsächlich die Steinsalzhorizonte der Staßfurt-Folge (Na2) und untergeordnet der Leine-Folge (Na3) in Frage. Die große primäre Mächtigkeit dieser Steinsalzhorizonte ist durch die Verfallung während des

Salzaufstieges und der Salzstockbildung in Norddeutschland noch vervielfacht worden. Dies ermöglicht, ein Endlager in das Zentrum mächtiger Steinsalzabfolgen zu positionieren und große Sicherheitsabstände zu potenziell lösungszutrittsgefährdeten Salzformationen wie Anhydrit, Salzton oder Kalisalzen einzuhalten.

In Tab. 16 sind Literaturdaten zur mineralogischen Zusammensetzung des Staßfurt- (Na₂) und Leine-Steinsalzes (Na₃) aus den Salzstöcken Asse und Gorleben zusammengestellt. Halit, Anhydrit und Polyhalit bilden die mineralogischen Hauptgemengteile. Davon stellt Halit mit über 90 % den Hauptanteil dar. Anhydrit ist mit bis zu 5 % praktisch immer vorhanden, Polyhalit tritt mit 0,1 bis 3,5 % sehr häufig auf. Kieserit und Carnallit sind in der Regel im Steinsalz nicht vorhanden. Sie treten nur gelegentlich als Nebengemengteile auf. Wasserunlösliche Spurengemengteile sind Tone und untergeordnet auch authigene Quarze sowie einige detritische Schwerminerale.

Tab. 16 Mineralogische Zusammensetzung des Staßfurt- (Na₂) und des Leine-Steinsalzes (Na₃)

Stratigraphischer Horizont	Staßfurt-Steinsalz (Na ₂)			Leine-Steinsalz (Na ₃)			
	Hauptsalz Na ₂ S	Speisesalz Na ₂ SP	Polyhalitisches Übergangssalz	k.A.	Linien-salz Na ₃ S	Banksalz Bändersalz	Basissalz Linien-salz Orangesalz
Untergliederung							
Salzstruktur	Asse	Asse	Asse	Gorleben	Asse	Gorleben	Gorleben
Literatur	/JOC 81/	/JOC 81/	/JOC 81/	/BOR 88/	/JOC 81/	/BOR 88/	/BOR 88/
	Mineralbestand [Gew.-%]						
Halit	92,60	98,90	95,06	95,0	97,95	97,1	94,4
Anhydrit	3,96	0,13	1,29	4,9	1,27	0,4	5,0
Polyhalit	3,42	0,79	3,05	0,1	0,54	2,0	0,5
Kieserit	0,09	-	0,55	-	0,06	-	-
Carnallit	-	-	-	-	-	0,5	<0,1
H₂O-unlös.	-	-	-	<0,1	k.A.	<1	<1
H₂O	0,26	0,15	0,57	k. A.	0,07	k. A.	k. A.

k. A. = keine Angaben

Neben den Steinsalzhorizonten treten in den Salinarfolgen des Zechsteins fast immer auch Kalium- und Magnesiumsalze auf, die überwiegend in den Kalisalzlagern kon-

zentriert sind. Es handelt sich bei diesen Gesteinen um primäre und teils um sekundäre Bildungen mit unterschiedlicher Mächtigkeit und unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung. Für die Kaligewinnung sind Sylvinit, Hartsalz und Carnallit die wichtigsten Salzgesteine. Diese Gesteine sind nicht als Wirtsgesteine für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen vorgesehen, wohl aber werden sie bereits für eine Ablagerung von chemisch-toxischen Abfällen verwendet (z. B. in den alten Kaliabbauern der in Untertagedeponien umfunktionierten Kalibergwerke Herfa-Neurode und Zielitz). Wegen der großen Häufigkeit von Kalisalzen muss davon ausgegangen werden, dass diese bei den Erkundungs- und Auffahrungsarbeiten auch in einem Endlager aufgeschlossen werden. Im Falle eines Lösungszutritts beeinflussen solche Kalilager die chemische Zusammensetzung der resultierenden Lösung deutlich.

Zu den primären Kalilagern gehören die Carnallitite /DAN 40/, /BOR 59/, /BRA 62/, /KÜH 72/, /HER 81/. Rund 70 % der deutschen Kalisalzlagerstätten bestehen aus Carnallit /DAN 60/. Carnallitite sind Salzgesteine, die hauptsächlich aus Carnallit, Halit und Kieserit bestehen. Untergeordnet können noch Anhydrit und Sylvinit, seltener Polyhalit und Bischofit vorkommen. Carnallitite bauen vorwiegend das Kaliflöz K2 (Kaliflöz Staßfurt) und seltener auch das Kaliflöz K3 (Kaliflöze Riedel und Ronnenberg) auf.

Die Sylvinit- und Hartsalze in den Zechsteinfohlen Norddeutschlands sind meist keine primären Bildungen, sondern durch Umlösung aus Carnallititen entstanden /DAN 60/, /BOR 59/, /BRA 62/, /KÜH 72/, /HER 81/. Sylvinit unterscheiden sich von den Hartsalzen durch höhere Sylvinit- und niedrigere Sulfatgehalte. Von den verschiedenen Hartsalz-Typen ist das kieseritische Hartsalz am weitesten verbreitet /SIN 88/ und auch wirtschaftlich von Bedeutung. Wahrscheinlich zur Zeit postkretazischer tektonischer Bewegungen sind warme Tiefenwässer in begrenzter Menge von unten in die primären carnallitischen Kalilager eingedrungen und haben diese in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung des Ausgangsgesteins unterschiedlich verändert /BOR 59/. Dieser Vorgang wird als Lösungsmetamorphose bezeichnet. War der Carnallit reich an Kieserit, sind daraus sekundäre kieseritische Hartsalze entstanden. Solche typischen Hartsalze werden gebildet, wenn die Temperatur bei der Umbildung der Hartsalze höher als 72°C war. Durch das Einwirken größerer Mengen heißer Tiefenwässer auf bereits gebildete kieseritische Hartsalze entstanden langbeinitische Hartsalze. Wurde die Temperatur von 55°C unterschritten, kam es zur Bildung von kainitischem Hartsalz. Die infolge der Lösungsmetamorphose gebildeten MgCl₂-reichen Lösungen wurden aus der Salzformation ausgepresst. Die anhydritischen Hartsalze, in

denen der Kieseritanteil teilweise oder ganz durch Anhydrit ersetzt ist, verdanken ihre Entstehung nach /DAN 60/ der Einwirkung von CaCl_2 -haltigen Tiefenwässern. Das CaCl_2 setzt sich mit Kieserit zu Anhydrit und MgCl_2 um, wobei letzteres mit den Lösungen abgeführt wird. Untersuchungen von /KÜH 72/ deuten darauf hin, dass zumindest ein Teil der Sylvinitite aus der Werra-Folge und ein Teil der Sylvinitflöze Ronnenberg und Riedel aus der Leine-Folge auch primärer Entstehung sein können.

Speziell Anhydrite können, wenn sie in größeren Mächtigkeiten auftreten, Lösungsspeicher darstellen. Beispiele für solche Gesteine sind der Leine- oder Hauptanhydrit (A3), der mit Mächtigkeiten von 20 - 50 m einen eigenständigen stratigraphischen Horizont bildet, und die Anhydritmittel (Na3am), Einschaltungen im Leine-Steinsalz (Na3), deren cm- bis dm-dicke Anhydritlagen geringmächtiger sind. Der Hauptanhydrit im Salzstock Gorleben besteht aus 93 Vol.-% Anhydrit, 5 % Magnesit und 2 % Ton, Carnallit und anderen Nebengemengteilen /HER 89/. Eine ähnliche Zusammensetzung haben auch die Anhydritlagen der Anhydritmittel. Anhydritgesteine sind spröde und zeigen ein anderes geomechanisches Verhalten als das plastische Steinsalz. Die tektonischen Bewegungen während des Salzaufstiegs haben im Hauptanhydrit und in den Anhydritmitteln zu einem rupturrellen Inventar geführt, das als Lösungsspeicher dienen kann und bei ihrem Anfahren in Grubenräumen häufig zu Lösungszutritten geführt hat. Viele der aufgegebenen Kalibergwerke sind durch Lösungszutritte, besonders aus dem Hauptanhydrit, abgesoffen /BAU 28/, /SPA 57/, /GIM 68/, /SCH 91/.

- **Genese**

Die Bildungsbereiche der Evaporite sind außerordentlich vielfältig /SON 84/, /MÜL 88/. Die größten Mächtigkeiten weisen marine Evaporite auf, die sich in subtropischen Meeresbuchten und Lagunen durch Eindunstung aus Meerwasser bilden. Dazu gehören auch die Zechsteinevaporite, auf die sich die weiteren Ausführungen beziehen.

Meerwasser ist eine Salzlösung mit 3,5 Gew.% an gelösten Salzen, mit den vier Hauptkationen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} und drei Hauptanionen, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Neben den Hauptkomponenten enthält Meerwasser noch ca. 70 Nebenbestandteile, deren Gesamtmenge mit 0,01 % rund 350 mal kleiner ist als die der Hauptkomponenten. Obwohl Anionen und Kationen des Meerwassers verschiedener Herkunft sind, näherte sich der Salzgehalt des Meerwassers schon seit dem Präkambrium (d. h. > 590 Mio. Jahre) einem stationären Zustand; seit dem Kambrium kann ein annähernd konstanter Salzgehalt im Meer angenommen werden /BRA 62/. Die Mengenverhältnisse der Ionen

des Meerwassers sind für die entstehenden Salzlagerstätten von ausschlaggebender Bedeutung.

Trotz einheitlichen ozeanischen Ursprungs bestehen im geochemischen Typus der Salzgesteine grundlegende Unterschiede. Die Zechstein-Kalisalze gehören zu einer kleineren Gruppe von Kalisalzvorkommen, die neben den Chloridmineralen Halit, Sylvin und Carnallit wechselnde Gehalte von Sulfatmineralen wie Kieserit, Kainit, Polyhalit, Langbeinit, Anhydrit u. a. aufweisen. Sie werden dem Sulfat-Typ zugeordnet. Eine größere Gruppe von Kalisalzvorkommen ist durch das Fehlen von Sulfatmineralen, vor allem von Kieserit und Kainit, charakterisiert. Sie enthalten praktisch nur die Chloridminerale Halit, Sylvin, Carnallit, Tachyhydrit und Bischofit und werden dem Chlorid-Typ zugeordnet.

Die Veränderung der Meerwasser-Zusammensetzung während der Salzausscheidung bei fortschreitender Eindunstung ist in Abb. 20 dargestellt. Die Lösungstemperaturen während der Evaporitbildung dürften zwischen 10°C und 50±10°C betragen haben /BOR 59/, /BRA 62/, /HER 81/.

Während einige der beobachteten Zechsteinsalzparagenesen mit einer Ausscheidung durch primäre Kristallisation aus dem Meerwasser unter Gleichgewichtsbedingungen zu erklären sind, sind andere Paragenesen durch frühe diagenetische und spätere Änderungen infolge der Einwirkung von Salzlösungen oder infolge von Temperaturänderungen entstanden.

Aus dem Meerwasser wird in einem frühen Eindunstungsstadium Gips ausgeschieden. In den Salzformationen tritt jedoch praktisch nur Anhydrit auf. Der zunächst gebildete Gips ist metastabil und wird in einem frühdiagenetischen Stadium in Anhydrit umgewandelt. Nach Gips kristallisiert Halit, der weder durch Diagenese- noch durch Metamorphoseprozesse verändert wird. Anders verhalten sich einige K-Mg-Mineralparagenesen. Während beim Chlorid-Typ die charakteristischen Minerale Sylvin und Carnallit sowohl unter stabilen als auch unter metastabilen Bedingungen primär aus dem Meerwasser kristallisieren, sind beim Sulfat-Typ die Verhältnisse wesentlich komplizierter. Bei Anwesenheit von MgSO₄ im Meerwasser können sich neben stabilen Paragenesen auch metastabile Bodenkörper bilden, welche später in stabile Phasen umgewandelt werden. Die Mineralbildungen unter stabilen und metastabilen Gleichgewichtsbedingungen führen zu teilweise sehr unterschiedlichen Paragenesen /BRA 62/.

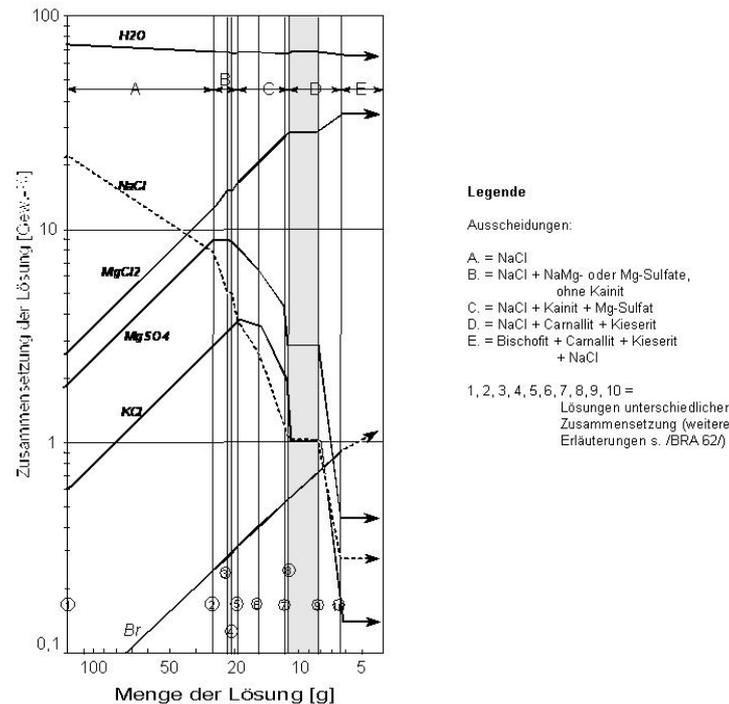


Abb. 20 Änderung der Lösungszusammensetzung während der Salzausscheidung, nach Beginn der NaCl-Ausscheidung, bei 25°C unter den Bedingungen stabiler Gleichgewichte, Ca-Salze nicht berücksichtigt /BRA 62/

Die marinen Evaporite, vor allem die Chloridminerale, reagieren empfindlich auf die Einwirkungen ungesättigter Lösungen, auf Temperaturerhöhungen und auf mechanische Beanspruchungen. Solche Prozesse sind mit Mineralreaktionen, mit Stofftransporten und mit einer Neuverteilung der Elemente verbunden und werden als Metamorphosen bezeichnet /BOR 59/, /BRA 62/, /HER 81/. Es werden drei Arten von Metamorphosen unterschieden /HER 81/:

1. Lösungsmetamorphose
2. Thermometamorphose
3. Dynamometamorphose

Bei der Lösungsmetamorphose wirken ungesättigte Lösungen auf die Salzgesteine ein und verändern sie in ihrer Zusammensetzung durch Auf- und Umlösung. Die Lösungsmetamorphose war in allen deutschen Zechsteinsalz-Lagerstätten wirksam. Ein Beispiel ist die sekundäre Bildung kieseritischen Hartsalzes aus primärem Carnallit bei Temperaturen über 72°C durch ungesättigte Salzlösungen nach dem folgenden Reaktionsschema /HER 81/ (83°C):

Carnallit+Kieserit+Halit + NaCl-Lösung → Kieserit+Sylvin+Halit + MgCl₂-Lösung Q_{83°C}

Carnallit

kieseritisches Hartsalz

Die Mineralumwandlungen infolge von Temperaturerhöhungen werden als Thermometamorphose bezeichnet. Aufgrund der engen Stabilitätsbereiche der Salzminerale finden bereits bei Temperaturerhöhungen von 50°C auf 100°C Mineralreaktionen statt. Hierbei können sich ohne Lösungszufuhr aus Salzhydraten hydratärmere sowie hydratfreie Minerale bilden, während aus dem freigesetzten Kristallwasser eine gesättigte Salzlösung entsteht. Beispiel /HER 81/:

Kainit + Halit → Kieserit + Sylvin + Langbeinit + MgCl₂-Lösung R_{83°C}

Kainitgestein

langbeinitisches Hartsalz

In einem Endlager, in dem sich im Randbereich eines HAW-Bohrloches Temperaturen von ca. 200°C einstellen können, sind kombinierte Wirkungen von Thermo- und Lösungsmetamorphose zu erwarten. Minerale wie Polyhalit sind bei diesen Temperaturen nicht mehr stabil. Sie zersetzen sich unter Bildung neuer Phasen und Freisetzung von Wasser. Das Wasser kann wiederum, wenn es nicht verdampfen kann, Lösungen bilden, deren genaue Zusammensetzung heute noch nicht hinreichend bekannt ist.

Die Dynamometamorphose (auch kinetische Metamorphose, d. h. an gebirgsbildende Tektonik geknüpft) bewirkt eine Verformung der Salzgesteine ohne mineralogische und chemische Veränderungen. Durch das bevorzugte "plastische Fließen" von Salzmineralen können mechanische Differentiationen zwischen verschiedenen Salzmineralen stattfinden. Die thermische Forcierung dieser Eigenschaft der Salzminerale wird einen vollständigen Einschluss der eingelagerten Abfälle bewirken.

Die Halokinese ist eine Erscheinungsform der Dynamometamorphose. Als Halokinese werden Verformungsvorgänge der Salzformationen bezeichnet, die auf Dichteunterschiede zwischen Evaporiten und dem Deckgebirge zurückzuführen sind. Die Dichte von Halit beträgt 2,17 g/cm³, die des Deckgebirges etwa 1,9 - 2,6 g/cm³. Die Halokinese wird wirksam bei der Absenkung der salinaren Sedimente in Tiefen über 1.000 m, bei einer Mindestmächtigkeit der Evaporite von 300 m und einer Neigung der Unterlage von mehr als 1° /HER 81/. Unter der Einwirkung des Überlagerungsdruckes werden die Evaporite zu einem aktiven Medium und steigen auf. Aus ursprünglich flach gelagerten Sedimenten werden mächtige Strukturen mit durch Verfaltung hervorgerufener kom-

plexer Innenstruktur (Beispiele sind die Salzstöcke Asse und Gorleben). Die Salzstöcke in Norddeutschland, in denen die Einrichtung von Endlagern vorgesehen ist, sind durch Halokinese entstanden.

3.2.2 Eigenschaften

- **Gebirgsmechanische Eigenschaften**

Steinsalz zeichnet sich durch eine hohe Plastizität und Dichtheit aus. Als Referenzdaten für norddeutsches Steinsalz können die Werte gelten, die an Steinsalz aus der Schachanlage Asse gemessen wurden: Dichte $\rho = 2,16 - 2,19 \text{ g/cm}^3$, dynamischer Elastizitätsmodul (dynamischer Young'scher Modul) = 33 - 35 GPa, statischer Elastizitätsmodul = 20 - 30 GPa, Poissonzahl $\nu = 0,23 - 0,28$, einaxiale Festigkeit $\sigma_c = 20 - 35 \text{ MPa}$, Bruchfestigkeit $\sigma_t = 0,5 - 2,3 \text{ MPa}$, Permeabilität $k < 10^{-21} \text{ m}^2$.

Das Kriechen des Steinsalzes ist abhängig von der Beanspruchung und der Temperatur. Das stationäre Kriechen wird mit einer Exponentialfunktion mit dem Parameter absolute Temperatur und einer Potenzfunktion mit dem Parameter Effektivspannung beschrieben. Ein Anstieg der Temperatur um 10 K führt infolge thermisch induzierter mikromechanischer Mechanismen zu einem um einen Faktor 2 höheren Anstieg der Kriechrate. Das Kriechgesetz lautet:

$$\dot{\varepsilon}_s = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \quad (1)$$

mit den Parameterwerten von /HUN 88/: $A = 0,18 \text{ d}^{-1}$; $n = 5$; $Q = 54 \text{ kJ/mol}$; $\sigma^* = 1 \text{ MPa}$; $R = 8,31441 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$,

wobei $\dot{\varepsilon}_s$ = effektive stationäre Kriechrate, A = Kriechfaktor, Q = Aktivierungsenergie, R = Gaskonstante, T = Temperatur, σ = Effektivspannung, σ^* = Normierungsspannung und n = Spannungsexponent.

Die Kriechrate ist auch vom Feuchtegehalt des Salzes abhängig, jedoch nur bei niedriger mittlerer Normalspannung, bei der ein Anstieg um den Faktor 50 beobachtet wurde. Die verschiedenen Steinsalztypen zeigen infolge einer unterschiedlichen mineralo-

gischen Zusammensetzung ein andersartiges Kriechvermögen, bei dem der Kriechfaktor A über mehr als zwei Größenordnungen variieren kann.

Die Verformung, Dilatanz und ein evtl. Versagen der Barrierefunktion von Steinsalz hängen wesentlich von der mittleren Belastung, der Geometrie der Belastung, dem Belastungsregime und der Temperatur ab. Die plastische Verformung steigt mit steigender mittlerer Effektivspannung, mit steigender Temperatur und mit fallender Deformationsrate, da Steinsalz sich bei ausreichend niedrigen Deformationsraten im Wesentlichen durch Kriechen verformt. Die Dilatanz steigt mit zunehmender Kriechdeformation. Hat die Schädigung einen Wert um $0,6 \text{ MJ/m}^3$ erreicht, kann unter dilatanten Bedingungen Kriechbruch auftreten. Im kompressiven Bereich erhält man eine Rekonsolidierung des aufgelockerten Salzes. Die Bruchfestigkeit steigt mit steigendem hydrostatischem Druck, aber mit fallender Temperatur an. Bei hohen Temperaturen wird Steinsalz duktiler und verformt sich durch Kriechen. Die Zugfestigkeit ist immer niedriger als die Kompressionsfestigkeit. Steinsalz weist zudem eine deutliche Festigkeitsanisotropie auf, welche jedoch mit ansteigendem isotropem Druck geringer wird. Dilatanzgrenzen und das Kurzzeitversagen von Gorleben- und Asse-Steinsalz sind in /HUN 94/ wie folgt zusammengefasst und spiegeln den Stand von Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet wider:

Konservative Bruchfestigkeit:

$$\tau_B = f(\sigma) \cdot g(m) \cdot h(T) \text{ mit}$$

$$f(\sigma) = b (\sigma / \sigma^*)^p$$

$$g(m) = 2k / [(1+k) + (1-k)J_m]$$

$$J_m = m(9 - m^2) / (3 + m^2)^{3/2}$$

$$h(T) = 1 \text{ für } 20^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$$

$$h(T) = 1 - c(T - 100^\circ\text{C}) \text{ für } 100^\circ\text{C} < T < 260^\circ\text{C}$$

$$b = 2,7 \text{ MPa}, \quad p = 0,65, \quad c = 0,002 \text{ K}^{-1}, \quad k = 0,74, \quad \sigma^* = 1 \text{ MPa}$$

Konservative Residualfestigkeit: $\tau_R = \tau_B$

$$\text{Dilatanzgrenzen (nur } m = -1): \tau_D = 0,86\sigma - 0,0168\sigma^2$$

wobei τ_B = Bruchfestigkeit, σ = mittlere Spannung, J_m = Spannungsvariante, m = Lode-Parameter (beschreibt den Belastungspfad) und τ_R = Restbruchfestigkeit.

- **Hydrogeologische Eigenschaften**

Eventuelle Wasser- oder Lösungszutritte aus dem Deckgebirge stellen einen unter bestimmten Randbedingungen denkbaren Wasserpfad und damit den wichtigsten Weg dar, der zu einer Mobilisierung und zu einem Transport von Radionukliden führen kann. Zutritte von kleinen Lösungsmengen, die aus der Salzformation selbst stammen und ein begrenztes Volumen haben, sind dabei weniger kritisch als Zutritte aus dem Deckgebirge, das ein praktisch unendlich großes Lösungsreservoir darstellt. Entsprechend ist die Kenntnis der Lösungsgenese, d. h. der Herkunft und Entwicklung von Lösungen, die bei der Erkundung angetroffen werden, ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung der Eignung des Wirtsgesteins. Kriterien für die Beurteilung von Lösungszutritten wurden z. B. von /HER 00/ und /HER 06/ entwickelt.

Das Störfallszenario „Wasser- oder Lösungszutritt“ ist beispielsweise denkbar, wenn Wasser oder Salzlösungen über Schächte oder Gesteinsbereiche mit erhöhter Permeabilität in das Endlager eintreten. Allerdings wird davon ausgegangen, dass dichte und langzeitstabile Schachtverschlüsse technisch machbar sind. Obwohl HAW-Endlager in homogenen Salzformationen eingerichtet werden sollen, können Anhydritlagen und Auflockerungszonen um Strecken und Einlagerungshohlräume Zonen mit erhöhter Permeabilität darstellen. Lösungs- oder Grundwasserzutritte sind auch über eine Schichtenfolge Deckanhydrit - Grauer Salzton - Leinekarbonat (DGL) denkbar.

Mächtige Anhydritlagen sind infolge ihres spröden Verhaltens häufig geklüftet und entsprechend als Lösungsspeicher bekannt. Intaktes Anhydritgestein weist dagegen ähnlich niedrige Permeabilitäten auf wie Steinsalz (ca. 10^{-21} m^2). In der Auflockerungszone um eine Abbaukammer wurden dagegen deutlich höhere Permeabilitäten von 10^{-17} m^2 gemessen /KAM 99/. Permeabilitätsuntersuchungen von /WIE 98/, /BEC 04/ an intaktem Steinsalz und in der Auflockerungszone um Steinsalzabbau haben Werte von $<10^{-20} \text{ m}^2$ bzw. 10^{-16} m^2 ergeben. Die aus dem Kriechen des Salzgebirges resultierende Konvergenz führt mit der Zeit zur Schließung von Hohlräumen und zur Verringerung der Permeabilität der Auflockerungszone (Selbstheilung, s. o.). Permeabilitätsmessungen in der Auflockerungszone um ein 80 Jahre altes Dammbauwerk in der Asse haben Werte um 10^{-18} m^2 erbracht /WIE 04/. Zurzeit wird an Modellen zur Berechnung der Verheilung der Auflockerungszone in Abhängigkeit vom Spannungsfeld gearbeitet.

- **Mobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden**

Alle geochemischen Aspekte, die im Nahbereich eines Endlagers in Salzformationen eine besondere Rolle spielen, hängen mit den Prozessen zusammen, die durch einen Wasser- oder Lösungszutritt ausgelöst werden. Solche Prozesse sind die Wechselwirkungen zutretender Lösungen a) mit dem Wirtsgestein, b) mit den Materialien der geotechnischen und technischen Barrieren sowie c) mit den Abfällen. Alle diese Prozesse wirken zusammen und ergeben in der Summe das geochemische Milieu, d. h. die Eh- und pH-Bedingungen in der wässrigen Phase, die zur Mobilisierung von Radionukliden aus der Abfallmatrix führen können. Um die Radionuklidfreisetzung quantifizieren zu können, sind zu den Wechselwirkungen a, b und c folgende quantitative Informationen erforderlich:

- a) Wechselwirkungen von Lösungen mit dem Wirtsgestein:
 - Chemische Charakterisierung der festen, flüssigen und gasförmigen Phasen im Endlagermedium Salz, einschließlich der Zusammensetzung, Umlösung, Herkunft und Genese von Lösungen
- b) Wechselwirkungen von Lösungen mit Barrierematerialien:
 - Zusammensetzung und Langzeitstabilität der Materialien der geotechnischen und technischen Barrieren
 - Korrosion von Behälter und Abfallmatrix, Bildung von Korrosionsphasen (Art und thermodynamische Stabilität), Gasbildung, Änderungen des chemischen Milieus durch diese Prozesse, Quantifizierung der Beziehungen zwischen diesen chemischen Prozessen und dadurch hervorgerufenen Änderungen von Porosität und Permeabilität mit ihren Einflüssen auf den Stofftransport
- c) Wechselwirkungen von Salzlösungen mit Abfällen:
 - Mobilisierung von Radionukliden aus der Abfallmatrix
 - Identifizierung der mobilen Spezies (Oxidationsstufe, freie Spezies, Komplex, Kolloid)
 - Bildung radionuklidhaltiger Sekundärminerale

- Sorption von Radionukliden und konkurrierender Systemkomponenten an Primär- und Sekundärphasen.

Im Endlager werden reduzierende Bedingungen vorherrschen, da durch die Korrosion der Behältermaterialien der anfänglich vorhandene Sauerstoff schnell verbraucht wird. Unter diesen Bedingungen treten die relevanten Aktiniden und Technetium in III- bzw. IV-wertiger Form auf. Die Zeit bis zum Versagen dünnwandiger Behälter durch Korrosion in einem Szenario mit einem unterstellten Lösungszutritt ist infolge der hohen Korrosivität der salinaren Lösungen relativ kurz. Darum wird in den Sicherheitsanalysen von der Barrierewirkung derartiger Behälter in der Regel kein Kredit genommen. Bei dickwandigeren Behältern kann die Standzeit unter diesen Bedingungen mehrere hundert Jahre betragen. Zur modellhaften Beschreibung der Radionuklidmobilisierung aus der Glasmatrix bzw. den direkt abgelagerten Abfällen sind dagegen eingehende Kenntnisse über die dabei ablaufenden Prozesse erforderlich. Ein wichtiger Parameter ist dabei das Feststoff/Lösungsverhältnis. Die genaue Kenntnis dieses Verhältnisses hilft, Überkonservativitäten in Sicherheitsanalysen abzubauen.

Für Endlager in Salzformationen wurden schon mehrere Sicherheitsanalysen für verschiedene Abfallarten, nicht aber für die direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen durchgeführt /BRÜ 85/, /STO 88/, /PAE 89/, /HIR 91/. Diese Berechnungen zeigen, dass folgende Radionuklide für eine ggf. resultierende Strahlenexposition in der Biosphäre besonders relevant sind: ^{99}Tc , ^{237}Np , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{129}I , ^{79}Se , ^{14}C , ^{135}Cs , ^{236}U , ^{238}U , ^{235}U , ^{227}Ac , ^{233}U , ^{59}Ni , ^{93}Mo , ^{94}Nb , ^{107}Pd , ^{36}Cl sowie ^{41}Ca .

Mit dem bisherigen Kenntnisstand sind geochemische Modellierungen nur für einige Radionuklide möglich, deren Verhalten in Salzformationen für relativ einfache und gut charakterisierte, geschlossene Systeme mittels geeigneter thermodynamischer Daten (Pitzer-Koeffizienten für die Berechnung von Löslichkeiten in hochsalinaren Lösungen) beschrieben werden kann. Die Beschreibung der Kolloidbildung ist nur phänomenologisch möglich. Verschiedene Aspekte des komplexen Nahfeldsystems, wie Löslichkeiten, Speziation, Bildung von Sekundärmineralen und Sorption sind durch Laborexperimente und geochemische Modellierung verstanden. Diese Prozesse werden in den heute verfügbaren Modellen für Langzeitsicherheitsanalysen in vereinfachter Form berücksichtigt. Für realistische und vergleichende Langzeitsicherheitsanalysen ist aber ein detaillierteres quantitatives Verständnis aller relevanten Prozesse erforderlich. Dafür fehlt noch eine vollständige und konsistente thermodynamische Datenbasis für Aktiniden und langlebige Spaltprodukte einschließlich entsprechender Löslichkeitsgren-

zen und Sorptionsparameter. An einer solchen Datenbasis wird in Deutschland gearbeitet. Darüber hinaus laufen auch Arbeiten zur Kopplung geochemischer Modellrechnungen an die Transportcodes der Langzeitsicherheitsprogramme. Damit erst wird die Berechnung eines zuverlässigen Quellterms, der alle oben beschriebenen Wechselwirkungen berücksichtigt, möglich. Dieser müsste auch die quantitative Beschreibung der Sorptionsprozesse und des Kolloidtransportes umfassen. Wünschenswert wäre auch, die bisher weitgehend unberücksichtigt gebliebenen Prozesse der Bildung und Remobilisierung von radionuklidhaltigen Sekundärmineralen und Sekundärakkumulationen sowie von sorbierten und ausgeschiedenen Radionukliden in den Quellterm mit einzu beziehen.

- **Thermische Belastbarkeit**

Für die Festlegung einer zulässigen Maximaltemperatur in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen müssen folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- a) Bruchspannungen im Nah- und im Fernfeld (z. B. an der Grenze zum Deckgebirge oder zu Gesteinen mit sprödem Bruchverhalten bei mechanischer Beanspruchung wie dem Hauptanhydrit) sind zu vermeiden, um die Bildung von Fließwegen für Lösungen und damit von Migrationspfaden für Radionuklide zu verhindern.
- b) Die thermische Zersetzung von Salzmineralen ist zu vermeiden, um die Bildung von Wegsamkeiten für den Radionuklidtransport zu verhindern.

Die Entwicklung des Temperaturfeldes in der Wirtsgesteinsformation, welche zu thermisch induzierten Spannungen führt, ist von der räumlichen Verteilung und von der Wärmeleistung der Abfallbehälter abhängig. Die Zersetzungswärme ihrerseits ist abhängig vom Radionuklidinventar und der Zeit der Zwischenlagerung. In Tab. 17 und Tab. 18 sind die Wärmeleistungen von Cogéma HAW-Kokillen und von Pollux-Behältern in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Die thermomechanischen Auswirkungen der HAW-Endlagerung in Steinsalzformationen wurden in verschiedenen Studien untersucht /PAE 89/, /SEK 93/. Unter Berücksichtigung von Zwischenlagerungszeiten von 30 und 40 Jahren für HAW und abgebrannte Brennelemente wurden Maximaltemperaturen von 134°C und 150°C im Einla-

gerungsfeld berechnet /WAL 89/. Damit wäre die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Bruchspannungen, welche die Zugfestigkeit von Steinsalz von ca. 1 MPa übersteigen, eher gering.

Tab. 17 Berechnete Wärmeleistung einer Cogéma HAW-Kokille /SCH 90/

Wärmeleistung [W]	Zeit [Jahre]
1.902	0*)
1.521	2
1.377	4
1.332	5
1.172	10
927	20
585	40
375	60
244	80
163	100
38,4	200
18,7	400
15,8	500
11,5	700
7,1	1000

*) unmittelbar nach der Verglasung

Tab. 18 Wärmeleistung eines Pollux-8-DWR-Behälters /DBE 98/

Wärmeleistung [kW]	Zeit [a]
8.165	*)
56,59	1
31,58	2
12,53	5
8,08	10
6,18	20
4,32	40
2,81	70
2,02	100
0,62	500
0,35	10 ³
0,08	10 ⁴
0,01	10 ⁵
0,00	10 ⁶

*) nach dem Ausbau der Brennelemente aus dem KKW

Das zweite Kriterium für die Auslegung eines HAW-Endlagers im Steinsalz ist die maximal akzeptable Temperatur hinsichtlich der thermischen Stabilität der Salzminerale. /JOC 81/ untersuchte die thermische Stabilität der Minerale Polyhalit $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ und Kieserit ($MgSO_4 \cdot H_2O$), welche als Nebengemengteile im Steinsalz der Einlagerungshorizonte auftreten können.

Polyhalit zeigt eine deutliche thermische Zersetzung bei 253°C, während bei Kieserit eine signifikante Zersetzung erst bei einer Temperatur oberhalb von 280°C einsetzt. Unter Berücksichtigung einer Sicherheitsreserve wurde daraufhin für die Auslegung des Endlagers eine zulässige Maximaltemperatur von 200°C für HAW-Endlager im Salzgestein vorgeschlagen.

Die Zersetzungstemperatur wiederum hängt vom Wasserdampf-Partialdruck ab, wie von /JOC 80/ für Carnallit gezeigt. In Konsequenz hierzu untersuchte /KER 80/ die thermische Freisetzung von Wasser aus Carnallit in Abhängigkeit vom Porendruck. Im

Ergebnis wurde gezeigt, dass die Zersetzungstemperatur des Carnallits von 100°C bis ungefähr 135°C ansteigt, wenn der Porendruck von atmosphärischem Druck bis auf ca. 4 MPa steigt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde zwischen einem HAW-Einlagerungsfeld und einem möglichen Carnallit-Flöz ein Sicherheitsabstand von 40 m vorgeschlagen /CEC 82/.

- **Seismizität**

Alle Endlagerstandorte in Salzformationen (Morsleben, Gorleben sowie die Schachanlage Asse) liegen in Norddeutschland, in einer Region mit geringer seismischer Aktivität. Nach /LEY 99/ wird eine probabilistische Quantifizierung der Erdbeben als notwendig erachtet, um die von /KTA 90/ geforderte deterministische Abschätzung zu bestätigen.

Alle oben genannten Endlagerstandorte liegen in drei seismotektonischen Provinzen, in denen nach /IAE 91/ in den letzten 1.200 Jahren nur wenige isolierte Erdbeben mit einer maximalen Intensität von VI MSK /SPO 65/ beobachtet wurden. Am Standort Konrad beispielsweise, der 35 km von der Asse entfernt liegt, weist nach /LEY 99/ ein Erdbeben mit einer Intensität von VI ½ MSK eine Wahrscheinlichkeit von $<10^{-5}$ /Jahr auf. Dieses Ergebnis wurde übereinstimmend mit deterministischen und probabilistischen Risikoanalysen ermittelt.

3.3 Tongesteine

Tongesteine werden in allen OECD/NEA-Mitgliedsländern als potenziell geeignete Wirtsgesteine für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen angesehen. Anders als bei den Gesteinsformationen Steinsalz oder auch Granit kann man bei Tongesteinen nicht von einem einheitlichen Gesteinstyp sprechen. Tongesteine weisen eine große Bandbreite vom plastischen Ton mit allen Übergängen bis zum stark verfestigten, spröden und z. T. geklüfteten Tonstein auf. Verschiedene, wie z. B. marine oder alluviale Sedimentationsprozesse, oder eine unterschiedliche Versenkungs- und Hebungsgeschichte mit der damit verbundenen spezifischen Temperaturgeschichte führen zu differierenden mineralogischen Zusammensetzungen mit unterschiedlichen Wassergehalten, die wiederum andersartige mechanische, physikalische und hydraulische Eigenschaften bedingen. Als Wirtsgesteine kommen prinzipiell sowohl wasserrei-

che, plastische Tone als auch wasserärmere, verfestigte und spröde Tonsteine in Betracht.

Trotz der Unterschiede haben alle Tongesteine allgemeine, für die Endlagerung günstige Eigenschaften wie:

- Sehr geringe Durchlässigkeit,
- Sehr geringe Wasserlöslichkeit
- Hohe chemische Pufferkapazität
- Hohes Sorptionsvermögen
- Fähigkeit zur Selbstverheilung.

Nachteilig können sich auswirken:

- Geringe Wärmeleitfähigkeit und geringe thermische Belastbarkeit
- Anisotropie der Gebirgsspannungen
- Vergleichsweise geringe Standfestigkeit von Hohlräumen
- Mögliche stoffliche Inhomogenität (Einschaltungen von sandigen Lagen).

Das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen setzt eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Strecken voraus. In Tongesteinen kann die Standsicherheit i. d. R. nur mit Ausbaumaßnahmen erreicht werden, insbesondere bei unverfestigten Tonen. In Deutschland kommen für die Endlagerung nur verfestigte Tonsteine in Betracht.

Plastische Tone der Boom-Formation werden aber in Belgien als potenzielle Wirtsgesteinsformation untersucht /HOR 87/. Andere Länder untersuchen mehr oder weniger stark verfestigte Tongesteine. Dazu gehören in der Schweiz der Opalinuston, in Frankreich der Callovo-Oxford-Ton, in Ungarn der Boda-Ton und in Japan der Mizunami-Ton.

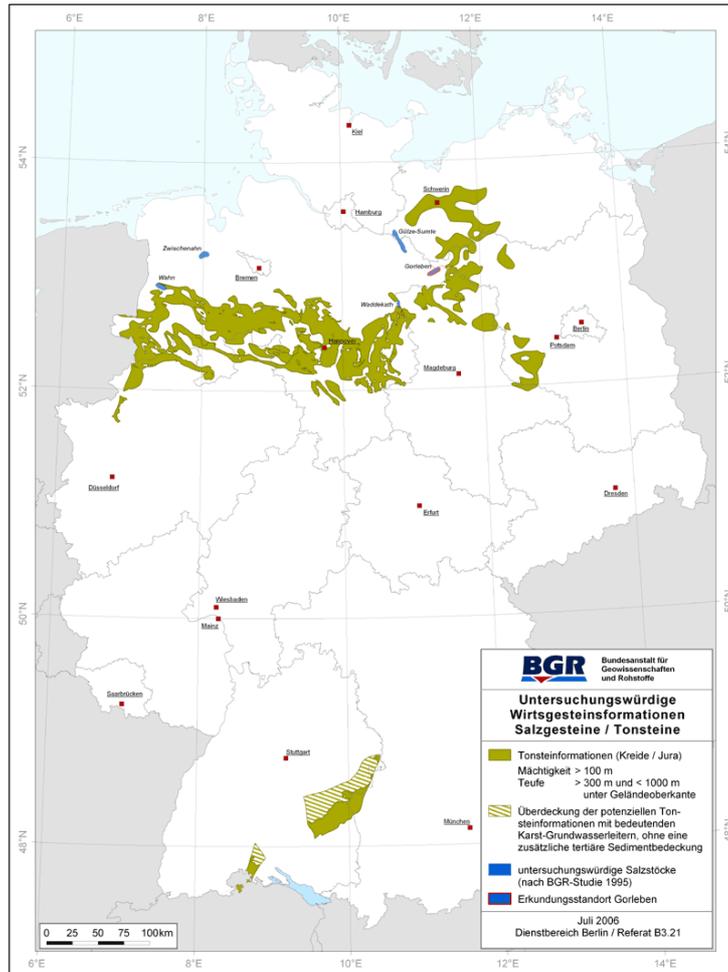


Abb. 21 Karte der untersuchungswürdigen Wirtsgesteinsformationen Salzgesteine / Tonsteine in Deutschland /BGR 06/

Generell steht bei den Arbeiten für die Endlagerung in Tongesteinen die Lösung gebergsmechanischer Probleme im Vordergrund /PUS 04/. Weitere Schwerpunkte der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (FuE) sind unter anderem:

- Vorhersage des langzeitigen Isolationspotenzials
- Effekte gekoppelter Prozesse
- Gasfreisetzung.

In umfangreichen nationalen FuE-Programmen wird in Belgien, Frankreich, Schweiz, Japan und Ungarn die Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle in eigenen Untertagelaboren untersucht. Spanische und deutsche Institutionen beteiligen sich mit eigenen Forschungsarbeiten in den Un-

tertagelaboren der Partnerländer. Untersuchungswürdige Tonsteinvorkommen für die Standortauswahl eines Endlagers wurden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in der Kreide Norddeutschlands und im Jura Nord- und Süddeutschlands identifiziert /BGR 06/ (Abb. 21).

3.3.1 Prinzip der Abfallisolierung

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Tone haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers und bedingen standortspezifische Auslegungen der Endlager.

Trotz der genannten Unterschiede bei Endlagern in Tongesteinen gibt es aber auch Gemeinsamkeiten. Die begrenzte Standfestigkeit der Tongesteine führt dazu, dass die optimale Tiefe der Einlagerungssohle bei ca. 500 m und damit höher als im Steinsalz oder Granit liegt. Die begrenzte Mächtigkeit von Tonformationen von wenigen 100 m führt zu einer geringen Höhe der Einlagerungsbereiche und erfordert eine größere laterale Erstreckung des Endlagers. Die Höhe des Endlagers muss gering gehalten werden, um die Mächtigkeit der Tonbarriere oberhalb und unterhalb des Endlagers für ihre Funktion als einschlusswirksamer Gebirgsbereich hinreichend groß zu halten. Die Einlagerung erfolgt in horizontalen Einlagerungskammern oder -bohrlöchern. Die Abstände zwischen den Einlagerungsbereichen werden von der relativ niedrigen Wärmeleitfähigkeit vorgegeben. Temperaturen von maximal 100°C sollen wegen der geringen thermischen Belastbarkeit nicht überschritten werden. Auch dies kann je nach geplanter Aufnahmekapazität des Endlagers zu großen lateralen Ausdehnungen führen. Die Fläche, die ein Endlager im Tongestein benötigt, ist deutlich größer als bei einem Endlager im Steinsalz. Um die erforderliche laterale Erstreckung realisieren zu können, muss das Endlager ggf. auch dem Einfallen (der Neigung) der Tonformation folgen.

Die geringe Standfestigkeit der Tongesteine erfordert i. d. R. einen Streckenausbau aus Stahl und/oder Zement, durch den das chemische Milieu im Endlagernahbereich und damit das Mobilisierungsverhalten von Radionukliden beeinflusst werden. Als Versatzmaterial ist quellfähiger Bentonit vorgesehen. Abb. 22 und Abb. 23 zeigen Beispiele von Endlagerauslegungen in einem plastischen und einem verfestigten Tongestein.

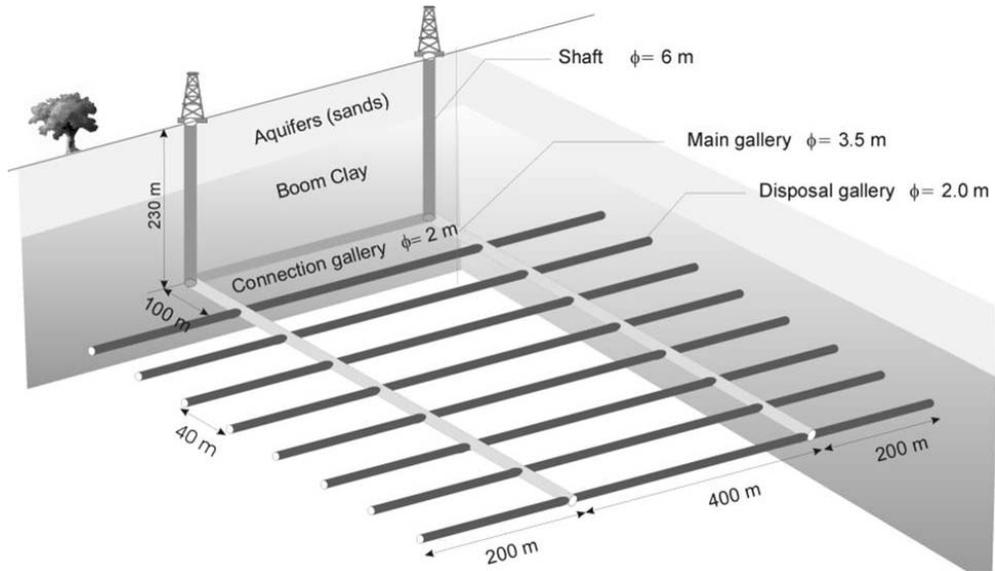


Abb. 22 Mögliches Design eines Endlagers im plastischen Boom-Ton in Belgien /VER 03/

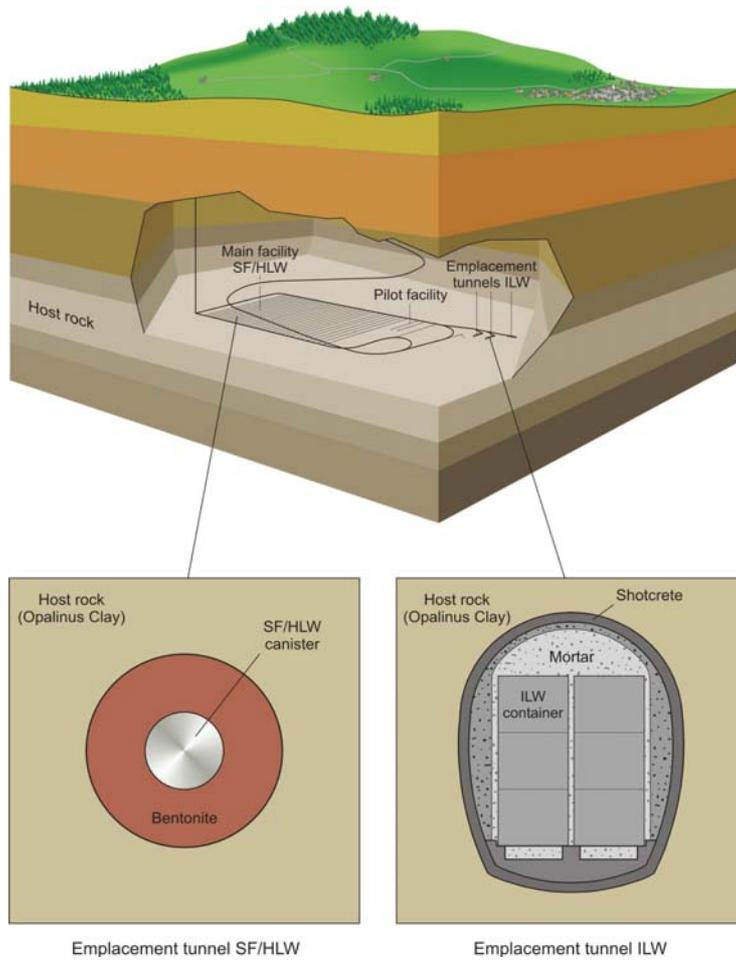


Abb. 23 Mögliches Design eines Endlagers im verfestigten Opalinuston in der Schweiz /NAG 02/

3.3.2 Eigenschaften

Nachfolgend werden einige besonders wichtige Eigenschaften von Tonen beschrieben und deren Einfluss auf die Langzeitsicherheit dargestellt. Anschließend werden diese Eigenschaften beispielhaft für den plastischen Boom-Ton und für die verfestigten Tongesteine Opalinuston und Bure-Ton quantifiziert.

- **Ausdehnung und Geometrie**

Die meisten für die Endlagerung potenziell geeigneten Tonformationen sind in großen Meeresbecken abgelagert worden und flach gelagert. In Langzeitsicherheitsanalysen geht die Systemgeometrie, d. h. die Tiefe, die Mächtigkeit und die Homogenität der Tongesteinsformation ein. Daraus ergeben sich wichtige Randbedingungen für eine mögliche Freisetzung von Radionukliden. Sie bestimmen die Länge der Ausbreitungspfade und die Art des (diffusiven oder advektiven) Transports.

- **Lithologie, mineralogische Zusammensetzung**

Die lithologische und mineralogische Zusammensetzung der Tongesteine und ihrer Kluffüllungen beeinflussen u. a. deren chemische, mechanische und Transporteigenschaften. Das elektrochemische Verhalten der Tonminerale hat einen wesentlichen Einfluss auf die Sorption und damit die Rückhalteeigenschaften der Gesteine. Die mineralogische Zusammensetzung bestimmt weiterhin die chemische Zusammensetzung der Porenwässer und weitere damit zusammenhängende Prozesse wie Osmose, Diffusion und Matrixdiffusion. Das Auftreten von Klüften und deren Füllungen kann von einem Tongesteinstyp zum anderen unterschiedlich sein. In stark verfestigten Tonsteinen sind häufig Klüfte anzutreffen. Diese sind i. d. R. mit Sekundärmineralen verheilt. Im Gegensatz dazu treten in plastischen Tonen kaum Klüfte auf. Die Informationen zur Lithologie und Mineralogie werden aus Proben, Bohrkernen und seismischen Profilen gewonnen. Die zu bestimmenden Parameter müssen für die endlagerrelevanten Bereiche repräsentativ sein, um mögliche Heterogenitäten, lithologische Besonderheiten und Klufsysteme zu erfassen.

- **Hydrogeologische Eigenschaften**

Die Strömung von Wasser in einer geologischen Formation und ein damit verbundener Transport von gelösten Stoffen werden wesentlich mitbestimmt durch die hydraulischen

schen Eigenschaften des Wirtsgesteins. Die entscheidenden Formationsparameter für die Strömung sind die Porosität, die das für die Strömung zur Verfügung stehende Volumen beschreibt, und die Permeabilität, die ein Maß für den Fließwiderstand darstellt. Die Matrixporosität stellt den Anteil des Porenvolumens am Gesamtgesteinsvolumen dar. Durch miteinander vernetzte Poren kann sich Wasser bewegen. Das Porenvolumen ist i. d. R. wassergesättigt. Nur ein Teil des Porenwassers ist allerdings frei und damit mobil. Ein anderer Teil ist in den Zwischenschichten der Tonminerale und an den Mineraloberflächen gebunden. Während das freie Wasser fließen kann, findet im gebundenen Wasser der Transport nur über Diffusion statt. Bei Tongesteinen gibt es eine höhere wasserzugängliche Porosität und eine niedrigere Anionenporosität, d. h. Anionen wie Cl^- , Br^- u. a. können sich infolge der elektrostatischen Wechselwirkungen mit den Tonmineraloberflächen nur in Teilbereichen der wasserzugänglichen Porosität bewegen.

Der Transport von gelösten Stoffen erfolgt durch verschiedene Prozesse. Grundsätzlich findet ein diffusiver Stofftransport aufgrund der Brown'schen molekularen Bewegung statt, also auch in ruhenden Porenwässern und in sehr kleinen Poren. Der Vorgang ist allerdings sehr langsam. Dennoch dominiert er die Transportvorgänge in intakten Tongesteinen. Die Formation nimmt über Porosität und Tortuosität² Einfluss auf die Stärke des diffusiven Stoffstroms.

In Zonen mit erhöhter Permeabilität kann demgegenüber der advective Transport überwiegen, das heißt, eine strömungsgebundene Bewegung eines Stoffes. Da die Stärke des Advektionsstroms auch vom Druckgradienten abhängt, lässt sich nicht generell sagen, wann die Diffusion oder die Advektion dominant ist.

Mit der Advektion ist auch der Effekt der Dispersion verknüpft, da die Fließwege in Poren und Klüften einen ständig wechselnden Querschnitt aufweisen und zudem auch mehr oder weniger von der mittleren Fließrichtung abweichen. Dies führt zu einer zur Diffusion analogen Ausbreitung längs und quer zur Fließrichtung. Die formationsspezifischen Werte für Längs- und Querdispersion charakterisieren die Stärke dieses Phänomens.

² kennzeichnet den Grad der „Gewundenheit“ der Transportwege in den Poren poröser Materialien. Sie wird für die Beschreibung verschiedener physikalischer Transportprozesse verwendet und ist neben der Porosität und der Permeabilität ein Parameter zur Beschreibung der Eigenschaften poröser Materialien.

Wasserwegsamkeiten, auf denen der Transport advektiv stattfindet, sind Zonen mit erhöhter Permeabilität. Stehen solche Zonen im großen Maßstab miteinander in Verbindung, können sie einen signifikanten Beitrag zur Ausbreitung von gelösten Stoffen/Radionukliden darstellen. Solche erhöhten Wasserwegsamkeiten in sonst intakten, dichten Tonen können sedimentären Ursprungs (lithologische Heterogenitäten, wie sandige oder karbonatische Lagen) oder tektonisch bedingt (Klüfte, Störungen) sein. Bereiche mit erhöhter Wasserdurchlässigkeit können in den Tonformationen räumlich heterogen verteilt auftreten. Sie zu identifizieren ist eine wichtige Aufgabe der Standortcharakterisierung.

An allen Standorten, an denen Tongesteine als potenzielle Endlagerwirtsgesteine untersucht werden, sind Porosität und Permeabilität so niedrig, dass von einem diffusionskontrollierten Transport ausgegangen wird.

Porenwasser- und Kluftwasserzusammensetzung

Die Zusammensetzung der Poren- und Kluftwässer ergibt sich aus der Konzentration der gelösten Salze, Gase und Schwebteilchen. Weitere signifikante Eigenschaften der Tonwässer sind pH-Wert, Redox-Potenzial, Temperatur und Isotopenzusammensetzung. Ferner muss bekannt sein, mit welchen mineralischen Phasen diese im Gleichgewicht stehen. Diese Daten sind wichtiger Bestandteil jeder Standortcharakterisierung. Sie gehen zwar nicht explizit in die Langzeitsicherheitsanalysen ein, beeinflussen aber entscheidend die gewählten Transportparameter der Modellierung. Die Zusammensetzung der Wässer ist sowohl für Nahfeld- als auch Fernfeldprozesse im Endlagersystem relevant. Im Nahfeld bestimmt sie die Prozesse der Radionuklidmobilisierung und -immobilisierung, die Behälterkorrosion und die Wechselwirkungen mit den technischen Barrieren. Im Fernfeld ist sie ggf. mitbestimmend für den Nuklidtransport.

Die Zusammensetzung fließender Wässer auf Klüften unterscheidet sich von der Zusammensetzung der Wässer in der Tongesteinsmatrix. Die Matrixwässer ihrerseits enthalten freies Wasser und gebundenes Wasser. Das freie Wasser befindet sich in den offenen Poren der Tongesteine. Gebundenes Wasser ist sorbiert oder strukturell an den geladenen Tonmineraloberflächen und -kanten gebunden. Kluftwässer sind einfach zu beproben, da sie anders als die Matrixwässer frei in Bohrlöcher zufließen. Um Matrixwässer zu charakterisieren, sind spezielle Techniken entwickelt worden.

Wegen der langen Verweildauer der Porenwässer in der Matrix wird von einem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Wässern und Gesteinszusammensetzung ausgegangen. Da die Hauptminerale in allen Tonformationen die gleichen sind, gleichen sich auch die Prozesse, die zu der vorgefundenen Porenwasserzusammensetzung führen. Manche Eigenschaften, wie Ionenaustausch, sind jedoch formationspezifisch und können selbst innerhalb einer Formation mit der qualitativen und quantitativen Mineralzusammensetzung variieren.

Manche Wasserinhaltsstoffe wie Chlor und Brom werden nicht von den Wasser/Gesteins-Reaktionen kontrolliert, sondern sind abhängig vom Fließregime in der Formation und von der Paläohydrogeologie der Region. Im Opalinuston von Mont Terri wurde z. B. nachgewiesen, dass der Cl⁻-Gehalt des Porenwassers marinen Ursprungs ist und die von der Mitte zu den Rändern der Formation beobachtete Abnahme der Gehalte durch Diffusion verursacht wurde.

Redox-Pufferkapazität des Porenwassers und des Gesamtsystems

Die Redox-Pufferkapazitäten der geologischen Barriere und des Deckgebirges werden im Wesentlichen von der Zusammensetzung der festen Phase bestimmt. Sie sind damit abhängig vom Feststoff/Lösungsverhältnis in der Formation. Die Redox-Pufferkapazität ist ein Maß für das Vermögen einer Formation, Änderungen des Redox-Potenzials zu widerstehen. Analog zur pH-Pufferkapazität ist die Redox-Pufferkapazität bei einem gegebenen Eh-Wert definiert als die Menge eines starken Oxidationsmittels, die zu einem Liter Probe zugegeben werden muss, um den Eh-Wert um ein Volt zu erhöhen. Während die bei der Redox-Pufferung ablaufenden chemischen Reaktionen prinzipiell gut verstanden sind, sind die Zeiträume, die für den Ablauf dieser Reaktionen notwendig sind (Reaktionskinetik), weniger gut bekannt und erfordern weitere Untersuchungen.

Behälterkorrosionsprodukte haben eine starke Pufferkapazität für radiolytisch entstandene Oxidantien. Pyrite und Siderite in der Tonformation und in Bentonitbarrieren wirken reduzierend. Die Bedeutung der Redox-Pufferkapazität für die Langzeitsicherheit eines Endlagers hängt vom betrachteten Szenario ab. Im Allgemeinen ist die Pufferkapazität von Tongesteinen wesentlich höher als die von Steinsalz.

- **Sorption**

Tongesteine können den Transport gelöster Stoffe, vor allem von Kationen, stark verlangsamen. Diese Eigenschaft ist auf Prozesse des Kationenaustauschs, der Oberflächenkomplexierung und des Anionenausschlusses zurückzuführen. Beim Anionenausschluss bewirkt die elektrostatische Abstoßung zwischen gelösten Anionen und negativen Teilladungen an Tonmineraloberflächen, dass Anionen an der Bewegung durch enge Poren gehindert werden. Beim Kationenaustausch werden Kationen aus der Lösung gegen Kationen in den Zwischenschichten der Tonminerale ausgetauscht. Der Kationenaustausch führt zum Ausgleich von Ladungsungleichgewichten, die ihren Ursprung im Kristallgitter der Tonminerale haben. Er ist somit im Unterschied zur Oberflächenkomplexierung pH-unabhängig.

Unter Oberflächenkomplexierung versteht man den reversiblen Austausch von Liganden an Mineraloberflächen. Sie ist pH-abhängig und somit abhängig von der Lösungszusammensetzung und den chemischen Eigenschaften der Minerale. Minerale aus der Tonformation, an denen Oberflächenkomplexierung stattfindet, sind insbesondere Fe-Oxide und -hydroxide, amorphe Kieselsäure und Quarz sowie organische Substanzen.

- **Geomechanische Eigenschaften und geomechanische Stabilität**

Die geomechanischen Eigenschaften eines Gesteins werden über Parameter (Zustandsparameter) definiert, welche den natürlichen Zustand eines Gesteins und dessen mechanische Antwort auf eine aufgebrachte Belastung und/oder Verformung (Modellparameter) beschreiben. Beispiele für Zustandsparameter von Tongesteinen sind: Dichte, Wassergehalt, Atterberg-Grenzen. Beispiele für Modellparameter sind Festigkeitsmodul, Spannungsparameter und Permeabilität. Die Modellparameter gehen in das Stoffgesetz ein, welches für ein Prozessmodell gewählt wurde. Die meisten Modellparameter sind vom Wassergehalt und der Schichtungsanisotropie des Tongesteins abhängig.

Die geomechanische Stabilität ist in der Betriebsphase eines Endlagers in Tongesteinen von besonderer Bedeutung. Sie ist entscheidend für die Funktionalität und Sicherheit der Einlagerung von Abfällen. Sie wird unwichtig nach Verfüllung der Einlagerungsbereiche. Die geomechanische Stabilität von verfestigten Tongesteinen ist höher als die von plastischen Tonen.

- **Selbstverschluss und Selbstverheilung**

Der Selbstverschluss ist ein Prozess, der in Tongesteinen zur Reduzierung der Permeabilität von Klüften führt. Die Selbstverheilung beinhaltet darüber hinaus eine Verbesserung der geomechanischen Eigenschaften des Tongesteins. Selbstverschluss und Selbstverheilung sind wichtige Eigenschaften der Tongesteine, weil der Verschluss von Wegsamkeiten für den advektiven Schadstofftransport einen hohen Beitrag zum Isolationspotenzial und zur Robustheit der Endlagerung in Tongesteinen leistet. Es sind vor allem diese Eigenschaften, die Tongesteine als Endlagerwirtsgesteine so geeignet machen.

- **Thermische Eigenschaften**

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Gebirgstemperatur in den verschiedenen Phasen eines HAW-Endlagers hängen von den thermischen Gesteinseigenschaften und der Wärmeentwicklung der hochradioaktiven Abfälle ab. Thermische Gesteinseigenschaften sind: Die Wärmeleitfähigkeit (K), die Wärmekapazität (C), die spezifische Wärme (C_p) und der thermische Ausdehnungskoeffizient (ϵ_t). Der wichtigste Mechanismus des Wärmetransportes in tonigen Gesteinen mit geringer Permeabilität ist die Wärmeleitung. Der Wärmetransport über Wasserkonvektion spielt eine untergeordnete Rolle. Die genaue Kenntnis der mechanischen, hydraulischen und chemischen Effekte in Verbindung mit der zeitweiligen Temperaturerhöhung in einem HAW-Endlager ist für die Beurteilung des Endlagernahbereiches, der Auflockerungszone und der technischen Barrieren wichtig. Die thermischen Gesteinseigenschaften können standortspezifisch mehr oder weniger großen Schwankungen unterliegen.

3.3.3 Tongesteine an ausgewählten Standorten

- **Boom-Ton**

Der Boom-Ton ist ein wasserreicher plastischer Ton, der im Mittleren Oligozän, vor 30 bis 35 Millionen Jahren im Meer des Campine-Beckens im Osten des heutigen Belgien abgelagert wurde. Am Standort des Untertagelabors „Hades“ bei Mol (Abb. 24) beträgt die Mächtigkeit der Formation ca. 100 m. Sie fällt mit $<1\%$ leicht nach NE ein. Im Norden Belgiens liegt der Boom-Ton in einer Tiefe von 400 m und im Nordosten in 1.000 m. Dort ist die Formation als Folge einer Grabenbildung tektonisch geklüftet.

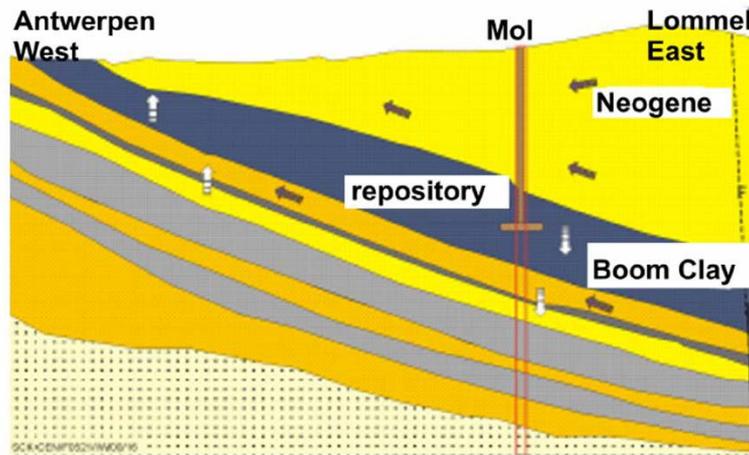


Abb. 24 Geologisch-hydrogeologisches W-E-Profil durch die plastischen Tone der Boom-Formation am Standort des Untertagelabors „Hades“ bei Mol in Belgien /OND 01/

Die mineralogische und chemische Zusammensetzung des Boom-Tons ist ziemlich einheitlich. Leichte Variationen treten in der Korngröße, im Karbonatgehalt und im Gehalt an organischem Material auf, was zu einer typischen Schichtung führt. Die Schichtung weist auf Änderungen der lokalen Ablagerungsbedingungen, der eustatischen Bewegungen (Hebungen und Senkungen) und des Klimas hin. Mineralogisch besteht der Boom-Ton aus 60 - 75 % Tonmineralen sowie aus 25 - 40 % Quarz, Feldspäten, Pyrit, Karbonaten, Gips und organischen Bestandteilen (Tab. 19, Tab. 20).

Tab. 19 Zusammensetzung der Tonfraktion des Boom-Tons [in %] (nach /VOL 96/)

Kaolinit	Illit	Smektit	Chlorit/Smektit-Wechselagerungen	Illit/Smektit-Wechselagerungen
20-30	20-30	10-20	5-10	5-10

Tab. 20 Zusammensetzung der nicht-tonigen Mineralfraktion des Boom-Tons [in %] (nach /VOL 96/)

Quarz	Feldspäte (Mikroclin, Plagioklas)	Pyrit	Calcit	Organika	Gips
20	5-10	1-5	1-5	1-5	Spuren

Der Wassergehalt des Boom-Tons ist hoch. Er entspricht der Matrixporosität und liegt zwischen 25 und 30 %. Die mittlere Permeabilität liegt bei 10^{-21} m^2 . Das Porenwasser weist die Zusammensetzung eines Na-HCO_3 -Typs auf. Der Gesamtsalzgehalt beträgt

12,5 mol/l. Der pH-Wert liegt zwischen 8,0 und 8,5. Die Redoxbedingungen sind reduzierend.

Charakteristische mechanische Eigenschaften des Boom-Tons sind die Kohäsion (100 KN/m^2), die Adhäsion (80 kPa) und der Adhäsionsreibungswinkel (10°). Der Boom-Ton stellt einen leicht konsolidierten Ton dar /PUS 04/. Die Kationenaustauschkapazität (CEC), als chemische Eigenschaft, die im Wesentlichen das Sorptionsvermögen des Boom-Tons bestimmt, liegt zwischen 15 und 30 meq/100g. Sie variiert je nach lokaler Zusammensetzung des Tons, weil sie sich aus den Einzel-CEC der Tonminerale zusammensetzt (Kaolinit 3 - 15 meq/100g, Illit 10 - 4 meq/100g, Smektit 80 - 150 meq/100g, Chlorit 10 - 40 meq/100g).

Die Hauptspannungen im Boom-Ton sind annähernd lithostatisch. Die Vertikalspannungen können bis zu einem Faktor 2 höher liegen als die horizontalen Spannungen /PUS 04/.

Triaxialversuche im Labor zur Messung geomechanischer Parameter haben folgende Ergebnisse gebracht /MAZ 03/:

- Poissonzahl $\nu = 0,43$, $\phi = 0,9 \text{ MPa}$
- Elastizitätsmodul 200 - 400 MPa
- Quelldruck = 0,9 MPa, Quelldehnung = 0,5 %
- Einaxiale Druckfestigkeit = 2 MPa
- Fließgrenze = 25 %
- Plastizitätsindex = 30 %.

Mittels eines in situ-Frac-Tests in ca. 230 m Teufe /PUS 04/ wurde nachgewiesen, dass ein hydraulisch induzierter Frac durch den Prozess der Selbstverheilung bereits vier Monate nach dem Fracken die Permeabilität des ungestörten Gebirges von $1,57 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ wieder erreicht hatte /MAZ 03/.

In einem In-situ-Großversuch im Untertagelabor Hades wurden im Boom-Ton eine Wärmeleitfähigkeit von $K = 1,69 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ und eine spezifische Wärme von $C_p = 1440 \text{ [W} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ bei einer Gesteinsdichte von 2 g/cm^3 ermittelt /MAZ 03/.

- **Opalinuston**

Der Opalinuston (Mittlerer Jura = Dogger, ca. 170 Mio. Jahre) tritt an der SW-Flanke der Mont Terri-Sattelstruktur im NW der Schweiz auf. Am Standort des Mont Terri-Untertagelabors (Abb. 25) beträgt die scheinbare Mächtigkeit des Opalinustons 160 m. Die Mächtigkeit des darüber liegenden karbonatischen Deckgebirges variiert zwischen 250 und 320 m. In der geologischen Vergangenheit betrug die maximale Mächtigkeit der Deckgebirgsschichten 1.000 m.

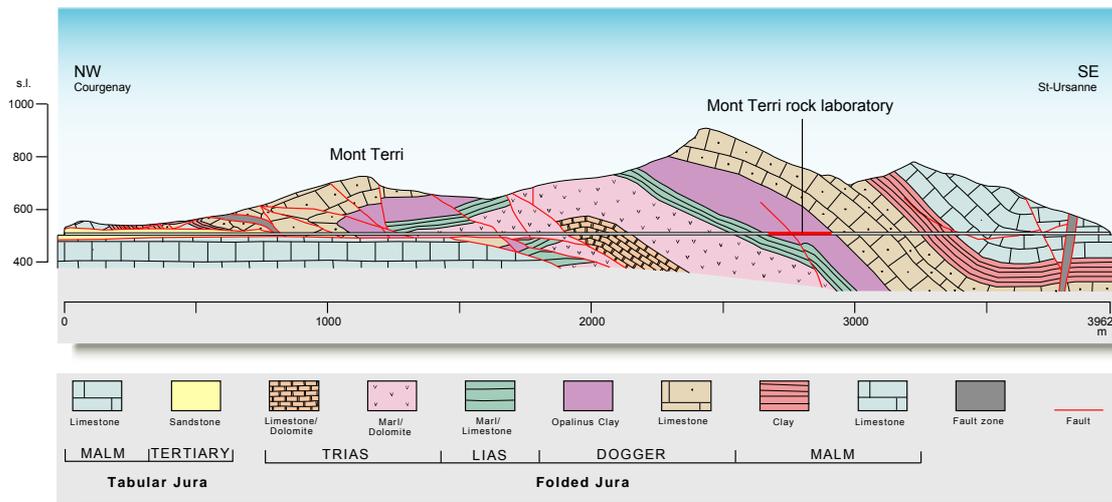


Abb. 25 Geologisches NW-SE-Profil durch den konsolidierten Opalinuston am Standort des Untertagelabors Mont Terri in der Schweiz /THU 99/

Die verbundene Matrixporosität des Opalinustons beträgt 13 bis 19 %. Dieser Porenraum ist wassergesättigt. Entsprechend hoch ist auch der Wassergehalt. Die in situ mit Packertests gemessene Permeabilität liegt senkrecht zur Schichtung zwischen $1 \cdot 10^{-23}$ und $6 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$. Parallel zur Schichtung liegt sie eine Größenordnung niedriger. Die Porenwässer gehören zum Na-SO₄-Cl-Typ, mit 0,3 mol/l Cl im Liegenden und < 0,05 mol/l Cl im Hangenden der Tonformation. Typische Zusammensetzungen der Porenwässer sind in Tab. 21 zusammengestellt. Die Redox-Pufferkapazität des Porenwassers ist vernachlässigbar gering. Da auf 1 kg Porenwasser eine vielfache Masse an Gestein kommt, wird die Pufferkapazität des Gesamtsystems von der des Gesteins bestimmt. Diese beträgt 2,3 - 4,9 meq/g und setzt sich aus den Pufferkapazitäten zusammen, die von den Gehalten an Pyrit (FeS₂), Siderit (FeCO₃) und Organika im Tongestein herrühren. Da nur Pyrit über den Endlagerzeitraum erhalten bleibt, ist die

Pufferkapazität des Opalinustons mit der des Pyrits gleichzusetzen und beträgt nur 0,1 - 0,2 meq/g.

Die Wasserbewegung ist wegen der geringen Permeabilität des Tongesteins und wegen des kleinen Druckgradienten vernachlässigbar gering. Der Porenwasserdruck im Fernbereich des Untertagelabors beträgt 2,1 MPa und die Gesteinstemperatur 15°C.

Tab. 21 Zusammensetzung von Opalinuston-Porenwässern [g/kg H₂O] (nach /PEA 99/, /PEA 06/)

Parameter	Typ A1	Typ A3	Typ Bohrloch BDR0 bei 25°C
NaCl	12,38	6,13	7,450
KCl	0,12	0,06	0,104
MgCl ₂	1,61	0,47	1,084
CaCl ₂	2,86	0,77	0,963
SrCl ₂	0,08	0,05	0,079
Na ₂ SO ₄	2,00	1,63	1,250
NaCO ₃			0,134
NaHCO ₃	0,04	0,05	
pH	7,6	7,9	7,3

Im Bereich des Untertagelabors Mont Terri beträgt die größte Hauptspannung der Tonsteinformation 6 - 7 MPa. Mit 70° Neigung liegt die größte Hauptspannung subvertikal und hat einen Azimut von 210°. Die zweite Hauptspannung, 4 - 5 MPa, ist mit 10° Neigung subhorizontal mit einem Azimut von 320°. Die niedrigste Hauptspannung beträgt 2 - 3 MPa. Sie ist ebenfalls subhorizontal. Der Azimut beträgt 50° und das Einfallen 20°. Wichtige geomechanische Parameter des Opalinustons sind in Tab. 22 zusammengefasst.

Tab. 22 Geomechanische Parameter des Opalinustons /MAZ 03/

	Senkrecht zur Schieferung	Parallel zur Schieferung
Elastizitätsmodul bei Ent- und Belastung	6 GPa	12 GPa
Einaxiale Druckfestigkeit	10 MPa	16 MPa
Zugfestigkeit	1 MPa	2 MPa
Scherfestigkeit	2,2 MPa bei 25°	
Scherfestigkeit der Schichtebenen	1,0 MPa bei 23°C	
Dilatanz	$\Delta V/V = -2 \cdot 10^{-3}$	$\Delta V/V = -4 \cdot 10^{-3}$

Quelldehnung	7 %	1 %
Quelldruck	1,2 MPa	0,6 MPa

Für den Opalinuston wurde nachgewiesen, dass durch den Prozess des Selbstverschlusses die Permeabilität von offenen Klüften von 10^{-17} m^2 auf 10^{-22} m^2 abnimmt /MAZ 03/. Die Permeabilität von 10^{-22} m^2 entspricht der des unverritzten Gesteins.

In In-situ-Versuchen wurden für den Opalinuston folgende thermische Gesteinsparameter bestimmt:

- Wärmeleitfähigkeit in 622 m Teufe senkrecht und parallel zur Schichtung $K = 1,79$ bzw. $3,23 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
- Wärmekapazität $C = 920 \text{ [J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ /MAZ 03/.

• Bure-Ton

Der Bure-Ton (Callovo-Oxford-Ton) ist eine ca. 155 Mio. Jahre alte, durchschnittlich 130 m mächtige Formation des Pariser Beckens (Frankreich). Die geschichteten Tonsteine sind im SW des Beckens 100 m und im NE 160 m mächtig. In dem von der ANDRA betrachteten, etwa 200 km^2 großen Untersuchungsgebiet Meuse / Haute Marne liegt die Mächtigkeit zwischen 130 und 160 m. Am Standort des Untertagelabors Bure / Haute Marne variiert die Mächtigkeit zwischen 135 und 138 m. Die Formation weist ein geringes Einfallen auf und steht in einer Tiefe zwischen 400 und 600 m an. Über und unter dem Bure-Ton liegen impermeable karbonatische Gesteine. Die Versuchsstrecken des Untertagelabors wurden in 445 m und 490 m Tiefe aufgeföhren (Abb. 26).

Mineralogisch besteht der Bure-Ton aus 40 - 45 % Tonmineralen, 20 - 30 % Karbonaten und 20 - 30 %, Quarz und Feldspäten. Die mittlere Gesteinsdichte liegt bei $2,4 \text{ g/cm}^3$. Die laterale Variabilität der mineralogischen Zusammensetzung ist gering. Um den Standort Bure wurde der Ton über eine Ausdehnung von ca. 200 km^2 mit den gleichen Eigenschaften nachgewiesen /REB 06/. Die wasserzugängliche Porosität beträgt 15 %. Die in situ gemessenen Permeabilitäten liegt zwischen $1,3\cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ und $1,7\cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Im Labor wurden an Bohrkernproben niedrigere Werte von $1\cdot 10^{-23}$ bis $4\cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ gemessen. Die chemische Zusammensetzung der Porenwässer entspricht dem Na-Cl-Typ mit 2,7 bis 8,5 g/l gelösten Salzen und einem Chloridgehalt von 0,7 - 2 g/l (Tab. 23).

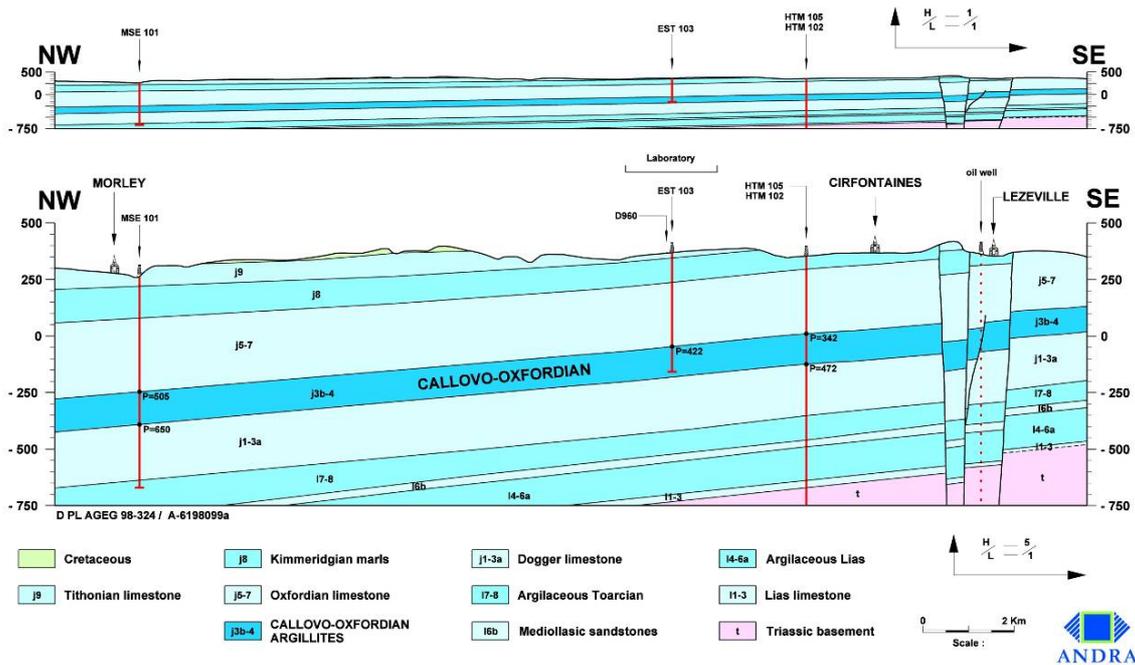


Abb. 26 Geologisches NW-SE-Profil durch den konsolidierten Callovo-Oxford Ton am Standort des Untertagelabors Bure in Frankreich /AND 99/

Tab. 23 Chemische Zusammensetzung des Ton-Porenwassers am Standort Bure

Parameter	mmol/l	Parameter	mmol/l
Na	33,940	Sr	1,206
K	1,333	Cl	30,290
Ca	12,840	SO ₄	27,540
Mg	11,990	HCO ₃	2,202

In Laborversuchen wurden an Bure-Ton-Proben folgende thermische Gesteinsparameter ermittelt:

- Wärmeleitfähigkeit senkrecht und parallel zur Schichtung $K = 1,65$ bzw. $1,27$ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- Wärmekapazität $C = 756$ [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] bei $20^\circ C$ /MAZ 03/.

Nach der mineralogischen Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften werden fünf unterschiedliche geomechanische Zonen ausgewiesen. Die maximale Hauptspannung entspricht der Horizontalspannung.

3.4 Granitmassive

3.4.1 Generelles, Prinzip der Abfallisolierung und Anforderungen

Kristalline Gesteine (in erster Linie Granite, aber auch metamorphe Gesteine) zeichnen sich besonders durch ihre hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre hohe Temperaturbeständigkeit aus. Auch ihre sehr geringe Wasserlöslichkeit ist für die Endlagerung günstig. Während die hydraulische Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im ungeklüfteten Zustand meist sehr gering ist (dichte Gesteinsmatrix), weisen diese Gesteine in geklüftetem Zustand deutlich höhere bis sehr hohe Durchlässigkeiten auf. In diesem Fall ist ein langzeitwirksamer, dichter Einschluss der Abfälle nur in Verbindung mit geeigneten technischen Barrieren (z. B. dickwandige Kupferbehälter, Bentonit-Versatz) zu gewährleisten.

Die für Belange einer Langzeitsicherheitsanalyse wesentlichen Reduktionseffekte stellen sich für ein Endlager im Granit folgendermaßen dar /NOS 96/:

- Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide im Nahbereich
- Sorption im Bentonitversatz
- Verdünnung im Fernfeld
- Sorption und Matrixdiffusion im Fernfeld

Für alle in Deutschland relevanten Wirtsgesteinsformationen, so auch für Granitmassive (Abb. 27), können angepasste Endlagerkonzepte grundsätzlich entwickelt werden. Da die Verhältnisse aber auch innerhalb einer Wirtsgesteinsformation zum Teil starken Schwankungen unterliegen, kann ein direkter Vergleich nur standortspezifisch erfolgen /WAL 05/.

Untersuchungen zu Granit bzw. Kristallin als Endlagerwirtsgestein sind seitens der Bundesrepublik Deutschland in erster Linie in Form einer Beteiligung an den FuE-Arbeiten in den Untertagelabors Stripa und Äspö (Schweden) sowie Grimsel (Schweiz) durchgeführt worden.

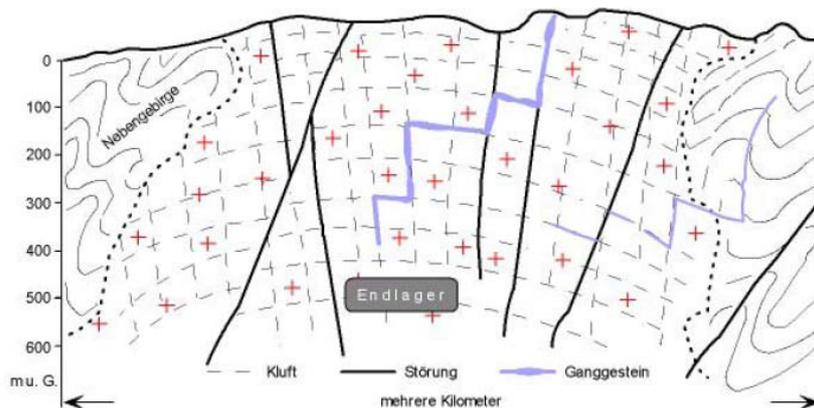


Abb. 27 Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystemtyp kristalline Gesteine (Granit) /BFS 05a/

- **Anforderungen**

Als Ergänzung zu den Untersuchungen in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein wurde in Deutschland auch die Möglichkeit der Endlagerung in kristallinen Gesteinen - zum Beispiel Granit - betrachtet. Die BGR veröffentlichte 1994 hierzu einen Katalog von untersuchungswürdigen Kristallinformationen für die Endlagerung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle, die sogenannte Kristallinstudie /BRÄ 94a/ und formulierte in diesem Zusammenhang auch die geologischen Voraussetzungen, die ein Kristallin-komplex erfüllen muss (Tab. 24).

Auch in der Schweiz, die über längere Zeit eine Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinen Gesteinen untersucht und im Rahmen des Projektes „Gewähr“ die grundsätzliche Machbarkeit nachgewiesen hat /NAG 85/, sind vergleichbare Anforderungen zusammengestellt worden /NAG 05/. Danach sind zur Gewährleistung eines sicheren geologischen Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle folgende übergeordnete Anforderungen für das gesamte Lagersystem (bestehend aus den technischen Barrieren und dem umgebenden Wirtsgestein in einer geeigneten geologischen Situation, „Gesamtsystem“) zu erfüllen:

- Langzeitstabilität
- Langfristig wirksamer Einschluss
- Technische Machbarkeit
- Genügende Belastbarkeit der Sicherheitsaussagen.

Tab. 24 Geologische Voraussetzungen für die Eignung eines Kristallinkomplexes als Wirtsgestein (nach „Kristallinstudie“ /BRÄ 94a/)

Regional-geologische Voraussetzungen	Tektonische und seismische Voraussetzungen	Hydrogeologische Voraussetzungen	Wirtsgesteinseigenschaften
Annähernd homogener Gesteinskomplex	Stabile Kristallinregion außerhalb potenziell aktiver Störungszonen	Allseitig niedrige Gradienten des regionalen hydraulischen Drucks im Wirtsgestein	Möglichst homogene Ausbildung
Ausreichende Mächtigkeit und hinreichend laterale Erstreckung	Einlagerungsstrecken frei von Störungs- und größeren Klüftzonen	Geringe Durchlässigkeit des Wirtsgesteins	Felseigenschaften zum sicheren Bau, Betrieb und Verschluss eines Endlagers
Mindesteinlagerungstiefe zur Verhinderung einer Beeinträchtigung der geologischen Barriere durch Erosionsvorgänge	Region möglichst geringer seismischer Aktivität (Zonierung nach /DIN 05/)	Geringe Fließgeschwindigkeiten in umgebenden Nebengesteinen	Gebirgs- und felsmechanische Eigenschaften zum kontinuierlichen Beschicken und Verfüllen der Hohlräume
			Thermische Leitfähigkeit zur schadlosen Ableitung der Nachzerfallswärme (u. a. Ausschluss thermisch induzierter Klüfte, Mineralumwandlungen)
			Keine Verschlechterung der Gesteinseigenschaften oder technischer Barrieren infolge Änderung geochemischer Wirtsgesteinseigenschaften

Unter anderem werden wenig gestörte Blöcke von Kristallingesteinen (Granite, Gneise, Vulkanite) aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit als Wirtsgestein in Betracht gezogen.

Bei der Betrachtung eines für eine Untersuchung vorzusehenden Bereichs in kristallinen Gesteinen zeichnen sich für Belange geologischer Langzeitprognosen aus heutiger Sicht /BRÄ 94a/ Zielgebiete von etwa 1 - 2 km² Größe für den Nahbereich eines Endlagers (Lagerbereich) und von etwa 10 - 15 km² für den Fernbereich ab.

Kristalline Gesteine werden jedoch in Deutschland aufgrund der ungünstigeren geologischen Verhältnisse im Vergleich zu Salzstöcken und Tonformationen als Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle derzeit nicht favorisiert.

In /BGR 06/ trifft die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe eine sogar noch weitergehende Aussage. Danach sind die Kristallinvorkommen in Deutschland ausgewiesen und geologisch kartiert. Aus den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden geht aber hervor, dass in Deutschland homogene und ungeklüftete Bereiche im Kristallin in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung nicht zu erwarten sind.

3.4.2 Eigenschaften

- **Hydraulische Eigenschaften**

Ungestörte Kristallingesteine sind aufgrund ihrer dichten Gesteinsmatrix generell sehr gering durchlässig. Als Folge tektonischer Beanspruchung kommen in diesen Gesteinen jedoch häufig Störungs- und Klüftzonen vor, die bevorzugte Wasserfließwege darstellen. Daneben können auch lithologische Inhomogenitäten (wie z. B. Ganggesteine, Vererzungen) Wasserwegsamkeiten bewirken. Untersuchungen (beispielsweise in Finnland und der Schweiz) haben gezeigt, dass aber tendenziell eine Abnahme der mittleren Gebirgsdurchlässigkeit mit der Tiefe erkennbar ist /NAG 05/.

- **Radionuklidrückhaltung**

Das Radionuklidrückhaltevermögen eines wasserführenden Klüft-/Störungssystems im Kristallin hängt - neben der Transmissivität - stark von der Verteilung der konkret wasserführenden Klüfte und Störungen (auch: Kanäle, channels) innerhalb solcher Systeme ab. Bei gleicher Transmissivität haben Systeme mit breiten, nahe beieinander liegenden channels ein größeres Rückhaltevermögen als Systeme mit engen, weit auseinander liegenden Kanälen. Das hydrothermal veränderte, tonig-poröse Umfeld der wasserführenden Systeme wirkt sich positiv auf die Radionuklidrückhaltung aus, weil dort die Radionuklide beim Transport in stagnierende Porenwässer hinein diffundieren können („Matrixdiffusion“).

- **Selbsteheilung / Selbstabdichtung**

Wasserführende Kluft-/Störungssysteme im Kristallin haben praktisch kein Selbstheilungs- oder Selbstabdichtungsvermögen. In frühen Phasen der geologischen Entwicklung des Kristallins können offene Klüfte zwar insbesondere durch hydrothermale ($> 100^{\circ}\text{C}$) Tonmineralbildungen und Karbonatausfällungen geschlossen worden sein, bei den heutigen Temperaturverhältnissen sind derartige Reaktionen aber extrem langsam und im Hinblick auf eine Selbstabdichtung irrelevant.

- **Beeinträchtigung der Barriereigenschaften**

Die Barriereigenschaften von geringdurchlässigen Kristallinblöcken können durch Auflockerungszonen beeinträchtigt werden, die sich um Strecken, Stollen und sonstige unterirdische Hohlräume bilden und dort eine erhöhte Wasserwegsamkeit zur Folge haben können. Die Charakteristika der Auflockerungszone hängen einerseits von den Gesteinseigenschaften, evtl. vorhandenen natürlichen Störungen und dem Spannungsfeld ab, andererseits auch vom Ausbruchverfahren. Aufgrund weltweiter Erfahrungen in Kristallingesteinen (z. B. /MAR 99/) ist die Bildung irreversibler Diskontinuitäten in der Auflockerungszone aber auf das unmittelbare Stollenumfeld (meist $< 1\text{ m}$) beschränkt und in manchen Fällen kaum nachweisbar (FEBEX-Experiment im Felslabor Grimsel - $> 0,01\text{ m}$ im Bereich des intakten Gebirges). Mit - im Hinblick auf die Gebirgsspannungen - geeigneter Ausrichtung der Strecken und sonstigen Hohlräume können negative Effekte minimiert und durch geeignete Maßnahmen beim Abdichten weitgehend beseitigt werden.

Kristallingesteine reagieren in der Regel wenig empfindlich auf durch die Abfälle verursachte Temperaturerhöhungen. Die Freisetzung von im Endlager gebildeten Gasen wird im Allgemeinen als wenig problematisch eingestuft /RÜB 04/.

- **Prognostizierbarkeit**

Es sind nach /NAG 05/ keine Prozesse bekannt, welche die Barriereigenschaften von Kristallingesteinen in geeigneter geologischer Situation innerhalb eines Zeitraumes von ca. 1 Mio. Jahren signifikant verändern könnten.

Sedimentüberlagerungen können ein Endlager in einem Kristallinkomplex gegen Oberflächeneinflüsse (z. B. Vergletscherungen) schützen, erschweren aber die Explorierbarkeit des Kristallins von der Erdoberfläche aus (s. u.).

- **Erkundung**

Wichtigstes Ziel der Erkundung des kristallinen Grundgebirges ist die Lokalisierung wasserführender Systeme. In Skandinavien beispielsweise, wo das kristalline Grundgebirge in weiten Gebieten an der Erdoberfläche aufgeschlossen ist oder nur von einer geringmächtigen Bodenschicht bedeckt ist, können Störungen an der Oberfläche kartiert werden. In anderen Gebieten jedoch, wo das kristalline Grundgebirge von z. T. mächtigen Sedimentabfolgen überdeckt wird, ist die Exploration von Störungen bzw. Kluftsystemen von der Erdoberfläche aus schwierig, da diese mit seismischen Methoden mangels seismischer Kontraste in der Regel nicht erkannt werden. Nur ausgeprägte Störungen, welche in jüngerer Zeit tektonisch aktiv waren und das Deckgebirge versetzt haben, können mittels Seismik, wenn auch nur indirekt, erfasst werden. Abschließende Aussagen sind deshalb nur anhand einer untertägigen Erkundung möglich.

Auch wasserführende Systeme, die nicht streng an größere Störungen gebunden sind, können - wenn überhaupt - erst im Verlauf untertägiger Untersuchungen zuverlässig lokalisiert und quantitativ bewertet werden.

- **Hydrochemie**

Um Aussagen zur grundsätzlichen Machbarkeit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in kristallinen Gesteinen bereits vor einer detaillierten Standortuntersuchung machen zu können, müssen die hydrochemischen Verhältnisse in ihren möglichen Bandbreiten bekannt sein /BRÄ 94b/. Dazu kann zunächst auf die Zusammensetzung von Referenzwässern aus anderen Kristallingebieten zurückgegriffen werden. Generell wird zwischen zwei Referenzwassergruppen unterschieden: a) saline Wässer und b) Süßwässer. Ein Vergleich der für Behältermaterial- und Versatzmaterialkonzeption wichtigen Parameter von Kristallin-Grundwässern aus geologisch unterschiedlich strukturierten Regionen ist in Tab. 25 dargestellt. Für die Anwendung auf deutsche Kristallingebiete erscheinen nach /BRÄ 94b/ die von der Nagra für die Nordschweiz angegebenen Referenzanalysenwerte von Süßwässern (Tab. 26) geeigneter als die von salinen Wässern in Skandinavien und in Kanada.

Tab. 25 Vergleich von Referenzgrundwässern in verschiedenen Kristallingebieten (aus /BRÄ 94b/, geringfügig modifiziert, Werte z. T. gerundet)

Land	Einheit	CH		D	S	FIN			CAN
Ref-Ort		Nagra Tiefbohrungen		KTB	Äspö	Kivetty KR1	Oikiluoto KR1		
Teufe	m	>200		3.800	>200	170	140	610	>600
pH		7-9	5,5-8	8,3-11,5	7,3-8,5	7,8	8,1	8,9	
Eh	mV	50 bis -310		-230 bis -580	-240 bis -300	-350	-270	-300	
Na ⁺	mg/l	150-350	1.600-2.800	>4.000	400-3.050	9,5	570	3.900	1.400
Mg ²⁺	mg/l	0,001-2	19-30		6,5-220	5,4	37	49	70-100
Ca ²⁺	mg/l	7-16	80-500		95-4.400	22	110	3.300	500
F ⁻	mg/l	7-16	2-9		1,3-4	2,3	0,55	1,1	
Cl ⁻	mg/l	14-180	2.400-3.700	>40.000	530-12.300	1,5	910	13.000	1.400
SO ₄ ²⁻	mg/l	120-600	700-2.100	>30.000	31-720	0,05	200	0,14	2.300
HCO ₃ ⁻	mg/l	180-450	850-950		7-215	80-160	15-350		16
O ₂	mg/l	0,008-5,85				0-0,4			
Ref-Gruppe		Süß	Salin	Salin	Salin	Süß	brack.	Salin	meist salin

Tab. 26 Analysen von Referenzgrundwässern im Kristallin der Nordschweiz (aus /BRÄ 94b/, geringfügig modifiziert)

	pH	Eh	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	B(OH) ₃	O ₂
		mV	mg/l									
West	7,66	-180	324	0,3	14	12,2	128	296	285	2,7	3,4	0,0005
Ost	7,68	-300	177	1,1	11,5	11,8	26	135			0,9	0,008

Referenzorte: West = Böttstein, Leuggern, Zurzach / Ost = Siblingen (mehrere Bohrungen)

3.4.3 Internationale Erfahrungen

Die umfangreichsten Erfahrungen mit Kristallingesteinen als Wirtsgestein stammen aus den kontinentalen Schildgebieten in Schweden, Finnland und Kanada (baltischer bzw. kanadischer Schild) /SKB 99/, /POS 03/, /GOO 94/. Auch in der Schweiz ist das kristalline Grundgebirge im Rahmen des Projektes „Gewähr“ /NAG 85/ untersucht, diese Option aber zugunsten einer Endlagerung im Opalinuston aufgegeben worden. In allen

Kristallingebieten treten geringdurchlässige, wenig deformierte Blöcke in einem Netzwerk von höher durchlässigen Störungen auf. Die Art der Zergliederung hängt von der tektonischen Entwicklung des jeweiligen Gebietes ab und ist deshalb standortspezifisch. Die Eigenschaften der im Rahmen der verschiedenen nationalen Entsorgungsprogramme untersuchten Kristallingesteine sind bezüglich des Radionuklidtransportes insgesamt recht ähnlich.

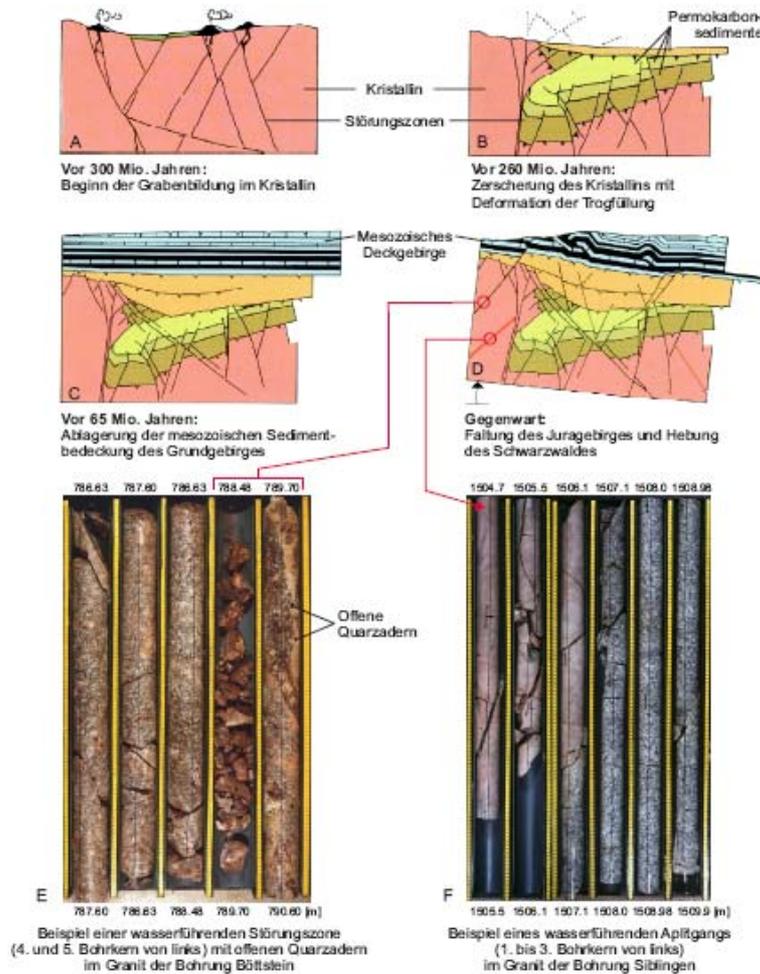


Abb. 28 Schematische Darstellung verschiedener geologisch-tektonischer Entwicklungsphasen der Nordschweiz mit Bildung und Reaktivierung von Störungszonen im Grundgebirge /NAG 05/

Im Gegensatz zu Deutschland besitzen Schweden und Finnland große, an der Erdoberfläche aufgeschlossene Kristallinvorkommen. Anders als diese zum Baltischen Schild gehörenden alten geologischen Einheiten (1,2 bis 3 Milliarden Jahre) sind die meisten deutschen Kristallinvorkommen wesentlich jünger (variskisch, ca. 300 Millionen Jahre). Trotz des jüngeren geologischen Alters sind die deutschen Granitgebiete

aber intensiver geklüftet, gestört und teilweise auch deformiert, da sie in einer geologisch wesentlich unruhigeren Region liegen als die skandinavischen Vorkommen. Besonders die Klüftung, die in einigen Kristallinkomplexen als zusammenhängende Klüftzonen teilweise noch in großer Tiefe zu finden ist, hat Auswirkungen auf die Grundwasserfließbewegungen und damit auch auf einen potenziellen Radionuklidtransport /BRÄ 94b/.

Das für eine Endlagerung in der Schweiz zeitweise betrachtete und untersuchte kristalline Grundgebirge der Nordschweiz weist Gemeinsamkeiten mit deutschen Granitgebieten auf. Sie gehören beide zu den zahlreichen, variskisch aufgestiegenen mitteleuropäischen Granitkomplexen. Besonders zwischen Südschwarzwälder Graniten und dem kristallinen Untergrund der Nordschweiz gibt es einen direkten Zusammenhang, so dass die in der Schweiz gewonnenen Erkenntnisse zum großen Teil auf die Schwarzwälder Granitgebiete übertragbar sind.

In Schweden und Finnland sind unterirdische Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle im Granit bereits in Betrieb. Auch für hochradioaktive Abfälle haben sich Finnland und Schweden für Endlager im Granit entschieden. Finnland hat den Standort Olkiluoto beschlossen. Die untertägigen Untersuchungen im finnischen Untertagelabor Onkalo sollen bis 2011 abgeschlossen sein. Das Genehmigungsverfahren und der Bau des Endlagers sollen dann bis 2020 /POS 08/ abgeschlossen sein. In Schweden bewerben sich zwei Gemeinden um das Endlagerprojekt. Auch in Frankreich gibt es generelle Überlegungen zu einem Granitstandort /BAU 97/.

Fazit

Es gibt keinen Wirtsgesteinstyp, der in jedem Fall eine größte Endlagersicherheit gewährleistet. So können auch für das Wirtsgestein Granit / Kristallin angepasste Endlagerkonzepte entwickelt werden, mit denen die Schutzziele eingehalten werden können. Nach Untersuchungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sind in der Bundesrepublik Deutschland allerdings homogene und ungeklüftete Bereiche im Kristallin in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung nicht zu erwarten, so dass diese Option nicht weiter favorisiert wird.

4 Wirtsgestein als Teil des Mehrbarrierenkonzeptes

4.1 Allgemeines

Der Begriff „Mehrbarrierenkonzept“ stammt ursprünglich aus der allgemeinen Sicherheitstechnik, wo sich derartige Konzepte in weiten Bereichen bewährt haben. Bei einem Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen wird zum sicheren Abschluss gegen die Biosphäre ebenfalls ein gestaffeltes System aus einer Kombination mehrerer möglicher Barrieren konzipiert (siehe Tab. 27).

Tab. 27 Barrieren im Rahmen des Mehrbarrierenkonzeptes. Die Zuordnung der in diesem Kapitel behandelten Wirtsgesteine ist in Fettdruck hervorgehoben

Technische Barrieren	Abfallform, Verpackung
Geotechnische Barrieren	Versatz, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse
Geologische Barrieren	Endlagerformation / Wirtsgestein , Deckgebirge / Nebengestein

Gemäß den bereits im Jahr 1983 veröffentlichten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /BMI 83/ muss durch einzelne oder die Summe dieser Barrieren sichergestellt werden, dass nach menschlichem Ermessen keine unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Biosphäre erfolgt. Je nach unterstelltem Störfall tragen die einzelne Barriere oder mehrere Barrieren ihren Anteil dazu bei, die Ausbreitung radioaktiver Stoffe ausreichend zu verhindern bzw. zu verzögern. Derzeit werden solche geologischen Konfigurationen bevorzugt, bei denen der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) sicherheitsrelevanter Teil des Wirtsgesteinskörpers ist und folglich die Hauptlast der Isolation trägt.

Auch in der Schweiz ist die Langzeitsicherheit eines Endlagers durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren zu gewährleisten (Prinzip 4 der Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle) /HSK 93/. Die Begrenzung der Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager in die Biosphäre soll durch passive Sicherheitsbarrieren erreicht werden und darf nicht auf nachträglicher Überwachung und Instandhaltung des Endlagersystems beruhen. Es sollen verschiedenartige technische und natürliche Barrieren vorgesehen werden, die gestaffelt zum Einschluss und zur Rückhaltung der Radionuklide beitragen (Mehrbarrierenkonzept).

Auch weltweit wird bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit das Mehrbarrierenprinzip angewandt. Ziel der mehrfachen Barrieren ist die wirkungsvolle Verhinderung eines Schadstoffaustrages im geforderten Isolationszeitraum, wobei die Leistung der Barrieren in ihrer Wirkung als Gesamtsystem liegt. Die einzelnen Komponenten des Systems müssen dabei aufeinander abgestimmt sein und sollen sich in ihrer zeitabhängigen Wirksamkeit ergänzen. Dies gilt insbesondere für die beiden Hauptgruppen der geologischen und der technischen Barrieren. Die zeitliche Wirksamkeit technischer Barrieren ist vornehmlich von den geologischen Verhältnissen abhängig, und auch umgekehrt ergänzt eine Endlagerkonzeption mit technischen Barrieren eine günstige geologische Gesamtsituation /AAE 02/.

Beispiel dafür ist das Konzept der Endlagerung abgebrannter Brennelemente in klüftigem Festgestein (z. B. Kristallin). Hier kompensieren die sehr aufwändigen technischen Barrieren, z. B. Kupferbehälter und Bentonit-Versatz, den Nachteil der Wasserführung einzelner Gebirgsbereiche. Auf der anderen Seite setzen die Funktionstüchtigkeit und die Wirksamkeit dieser technischen Barrieren ein geologisches Umfeld mit stabilen hydrochemischen Bedingungen voraus. In Kontakt mit Salzlösungen stellt dagegen ein Kupferbehälter keine langfristig wirksame Barriere dar /AAE 02/.

Diese wechselseitigen Beeinflussungen werden auch in /GRU 05/ als bedeutsam herausgestellt. Danach müssen die geologischen und technischen Barrieren eines Endlagers als integriertes System bewertet und Wechselwirkungen zwischen Abfall und Wirtsgestein berücksichtigt werden, wobei die sicherheitsrelevanten Beziehungen zwischen den verschiedenen Barrieren eines Mehrbarrierensystems sehr unterschiedlich sein können:

- Einzelne Barrieren können andere schützen bzw. für deren Langzeitwirksamkeit von Bedeutung sein (Beispiel: Schutz einer Salzstockoberfläche vor Einwirkungen durch Grundwasser)
- Vorgänge in einzelnen Barrieren können die Wirksamkeit anderer Barrieren beeinträchtigen (Beispiel: Mögliche Beeinträchtigung der geologischen Barriere durch Gasbildung in den Abfällen).

Die Isolationsfunktion eines Endlagers für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen soll in Deutschland im Rahmen des Mehrbarrierensystems vorrangig durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Zusammenwirken mit geotechnischen Barrieren, insbesondere dem Schachtverschluss gewährleistet werden. Dem

- **Salzgesteine**

Bei einem Endlager in Steinsalz stellt der einschlusswirksame Gebirgsbereich als Teil des Wirtsgesteinskörpers selbst die Hauptbarriere dar. Die Sicherheit eines derartigen Endlagers beruht in erster Linie auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle im Steinsalz, der durch Wasserfreiheit und geringe Permeabilität des Steinsalzes begünstigt wird. Aufgrund der Kriechfähigkeit des Steinsalzes sind technische Barrieren nur für den verhältnismäßig kurzen Zeitraum wichtig, bis die noch vorhandenen restlichen Hohlräume durch Konvergenz geschlossen sind. Der vollständige Einschluss kann allerdings nur wirksam werden, wenn ein Wasserzutritt zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich verhindert wird. Es kann deshalb Aufgabe des Deckgebirges sein, den Salzgesteinskörper vor einem Angriff durch Grundwasser bzw. saline Lösungen zu schützen und ggf. die Ausbreitung von Radionukliden zu verzögern.

- **Tongesteine**

Auch bei Endlagerkonzepten in Tonstein übernimmt der einschlusswirksame Gebirgsbereich aufgrund seiner geringen Durchlässigkeit und seines hohen Sorptionsvermögens die wichtige Rolle der (geologischen) Hauptbarriere. In Abhängigkeit von der standortspezifischen Ausbildung können umgebende Gesteinseinheiten (z. B. Deckgebirge) ebenfalls als Teil des Mehrbarrierensystems betrachtet werden. Das Isolationspotenzial eines tonigen Wirtsgesteinskörpers ist weitgehend unabhängig von technischen Barrieren. Tonige Gesteinsformationen bieten normalerweise stabile und günstige Eigenschaften für ein EBS (**E**ngineered **B**arrier **S**ystem).

- **Kristalline Gesteine**

Die Aufgabe der geologischen Barriere bei einem Endlagersystem in Kristallingestein besteht hauptsächlich im Schutz des EBS und in der Schaffung stabiler chemischer Verhältnisse. Auch die Rückhaltefunktion des Gesteins spielt eine wichtige Rolle. Allerdings können die Rückhalteeigenschaften aufgrund sehr heterogener Grundwasserströmungen in Kluftsystemen deutlich variieren. Grundsätzlich ist die Bedeutung des EBS bei einem Endlager in Kristallingesteinen größer als bei plastischen Gesteinen (Steinsalz und Tonstein). Der Vorteil eines Kluftsystems liegt in der Verteilung von im Endlager entstehenden Gasen, so dass die Entstehung hoher Gasdrücke vermieden wird.

Die wichtigsten barrierewirksamen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sind in Tab. 28 zusammengefasst.

Tab. 28 Barrierewirksame Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (nach /GRU 05/)

	Positive Eigenschaft	Negative Eigenschaft
Salzgestein	Geringe effektive Porosität	Geringes Sorptionsvermögen
	Geringe Durchlässigkeit für Wasser und Gas (Isolation)	Geringe Durchlässigkeit gegenüber Gas (Druckaufbau)
	Viskoplastisches Verhalten	Starke Wasserlöslichkeit
	Beschleunigung der Konvergenz mit zunehmender Teufe und Temperatur	
	Bei Salzstöcken: große vertikale Ausdehnung	Besonders bei Salzstöcken: komplexer Bau, Vergesellschaftung mit anderen Salz-/Gesteinstypen mit anderen Eigenschaften
Tonstein	Geringe Gebirgsdurchlässigkeit	Geringe Durchlässigkeit gegenüber Gas
	Hohes Sorptionsvermögen	Starke Variation in Zusammensetzung und Eigenschaften
	Plastizität nicht konsolidierter Tone	Beeinträchtigung der Plastizität und des Quellvermögens mit zunehmender Teufe und Temperatur
	Quellvermögen	
	Chemische Pufferkapazität	
Kristalline Gesteine	Hohe Durchlässigkeit gegenüber Gas	Heterogen verteilte und an Trennflächen gebundene hohe Gebirgsdurchlässigkeit
	Rückhaltevermögen abhängig von Ausbildung wasserleitender Kluft- / Störungssysteme und den Sorptionseigenschaften	
	Stabile chemische Verhältnisse	

4.3 Überlegungen zu einem Standortauswahlverfahren

Für die Entwicklung eines Standortauswahlverfahrens ist es wichtig, ob ausgehend von einer technisch ausgerichteten Endlagerkonzeption eine dazu passende geologische Umgebung gesucht werden soll oder ob umgekehrt zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation gesucht werden soll, deren Barrierewirkung durch an sie angepasste technische Barrieren ergänzt wird. Bei der Entscheidung zwischen beiden Alternativen und bei der Einschätzung der Bedeutung der Barrieren hat der AkEnd der Langzeitsicherheit ein besonderes Gewicht zugemessen. Daher ist der AkEnd der Auffassung, dass im Auswahlverfahren zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation gesucht werden soll. Die in die Abwägung beider Alternativen einfließenden Vor- und Nachteile sind im Folgenden zusammengestellt /AAE 02/.

Bei einer auf einer günstigen geologischen Gesamtsituation basierenden Endlagerkonzeption übernimmt das geologische Umfeld den Hauptteil der Barrierewirkung. Die technischen Barrieren fungieren in diesem Fall als Ergänzung. Vorteil aus Sicht des langzeitsicheren Einschlusses ist, dass sich diese geologischen Strukturen vielfach über sehr lange Zeiträume gebildet und erhalten haben. Unter günstigen Verhältnissen ist in ihnen der grundwassergebundene Stofftransport besonders im tiefen Untergrund stark begrenzt und läuft im Allgemeinen nur sehr langsam ab. Es ist davon auszugehen, dass Veränderungen im geologischen Barriersystem ebenfalls durch eine für die Langzeitsicherheit des Endlagers wichtige extreme Verzögerung gekennzeichnet sind. Diese Prozesse erstrecken sich über Zeiträume von Millionen Jahren und können auch für ähnlich lange Zeiträume prognostiziert werden.

Geologische Barrieren zeichnen sich zudem durch große Mächtigkeiten aus. Sie stellen ein robustes System dar, welches sich unempfindlich gegenüber wechselnden Einflüssen in der Vergangenheit gezeigt hat und von daher in seiner Isolationswirkung über lange Zeiten Sicherheitsreserven besitzt.

Begründet sich der Sicherheitsnachweis für ein Endlager auf einem langfristig dichten Einschluss der Abfälle, so ist diese Anforderung im Wesentlichen an das plastisch/viskoplastische Verhalten einer geologischen Formation (Tonstein / Steinsalz) gebunden. Damit basiert die Isolationsfunktion des Endlagersystems vorrangig auf den vorteilhaften Eigenschaften von Gesteinsformationen und günstigen geologischen Strukturen.

Bei der Betrachtung der Langzeitsicherheit kann das zukünftige Verhalten geologischer Strukturen und Formationen auch anhand nachvollziehbarer geologischer Abläufe in der Vergangenheit abgeschätzt werden. Die Prognose der Verhältnisse in einer Endlagerregion kann sich in einem solchen Fall auf eine bekannte oder ermittelbare geologische Historie stützen. Dabei liefern natürliche Analoga als Indikatoren wichtige Erkenntnisse über unterschiedliche geologische Prozesse.

Die Darstellung relevanter natürlicher Analoga trägt einerseits zur Nachvollziehbarkeit der Sicherheitskriterien bei und ist andererseits als unterstützendes Argument für die Sicherheitsbetrachtung und eine fortschreitende Vertrauensbildung anzuführen. Gerade die sehr langen Zeiträume, in denen die Prozesse in der Natur ablaufen und die für die Prognose der Endlagersicherheit herangezogen werden, sind für die Öffentlichkeit nur schwer zu erfassen. Unter Zuhilfenahme von natürlichen Analoga als „geowissenschaftliche Demonstrationsobjekte“ können Unsicherheiten bei der Beurteilung eines sicheren Endlagers relativiert und das Verständnis der Öffentlichkeit verbessert werden.

Nachteilig ist bei der Konzeptalternative geologische Barriere, dass geologische Formationen und Strukturen sehr heterogen aufgebaut sein können. Ihre Beurteilung setzt daher ein gutes Verständnis der komplexen Zusammenhänge, welche die Qualität der geologischen Barriere bestimmen, voraus. Das bedeutet für die Standorterkundung und für die Ermittlung der Datengrundlage für den Langzeitsicherheitsnachweis, dass z. T. aufwändige Messverfahren zur Erfassung der geologischen Situation eingesetzt werden müssen.

Die natürlichen geologischen Verhältnisse mit ihrer langfristigen Entwicklung können grundsätzlich nicht verändert werden. Es ist folglich auch nicht möglich, die geologische Situation als solche zu verbessern. Bekannte Defizite müssen in Kauf genommen werden, wenn sie nicht zum Entscheid gegen den Standort führen. Ein Endlager, für das der Sicherheitsnachweis im Wesentlichen auf geologischen Barrieren aufbaut, muss in jedem Fall mit einem geotechnischen Bauwerk, dem Schachtverschluss, verschlossen werden.

Bei der zweiten Konzeptalternative bilden die technischen Barrieren den Kern des Sicherheitskonzepts. Die Wirtsgesteinsformationen bilden nur das langzeitstabile "Gerüst" für den Einbau und die langfristige Wirksamkeit der technischen Barrieren. Vorteil dieser Konzeption ist, dass technische Materialien (z. B. die Kupferummante-

lung der Abfallbehälter) den Sicherheitsanforderungen entsprechend herstellbar sind. Ihre Zusammensetzung (z. B. Industrie-Bentonit als Versatzmaterial) ist normierbar, d. h. sie ist mit geringen Schwankungsgrenzen einstellbar. Eine modellmäßige Beschreibung des Materialverhaltens ist somit leichter möglich als dies bei natürlichen Materialien, deren Eigenschaften eine größere Schwankungsbreite aufweisen, der Fall ist (z. B. tonige Gesteine) (vgl. Abb. 30).

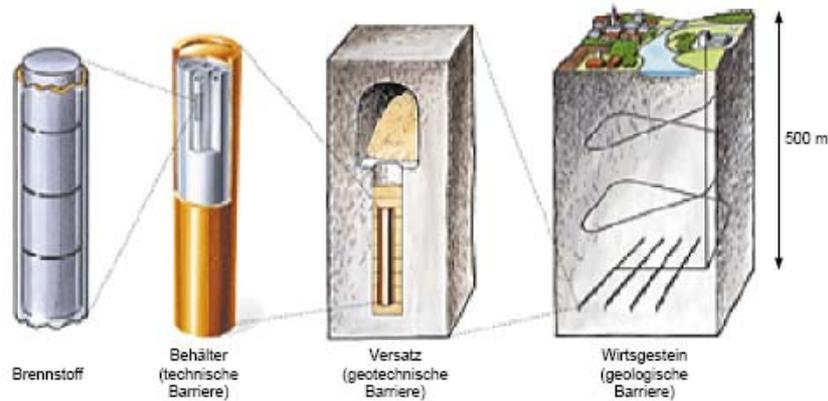


Abb. 30 Technische Barrieren werden bevorzugt dort eingesetzt, wo die geologischen Verhältnisse den sicheren Einschluss nicht allein gewährleisten können (Beispiel Kristallin in Schweden) /PUS 04/

Nachteil dieser Konzeptalternative ist, dass für den Nachweis ihrer Robustheit z. T. erhebliche Forschungsarbeiten erforderlich sind. Die Einschätzung der Leistungsfähigkeit technischer Barrieren ist somit an den aktuellen Stand der Materialforschung gebunden und beruht z. T. auf nur wenigen Erfahrungen bezüglich des Langzeitverhaltens der Materialien. Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften technischer Barrieren sind daher (wenn überhaupt) nur schwer über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren extrapolierbar.

Generell gilt, dass nur ein vollständiges und abgestimmtes Barriersystem den Einschluss der Schadstoffe im Endlager dauerhaft gewährleisten kann. Unter Abwägung der dargestellten Vor- und Nachteile ist der AkEnd /AAE 02/ zu der Einschätzung gekommen, dass die geologischen Barrieren und der Schachtverschluss im Hinblick auf die Langzeitsicherheit die Hauptlast tragen sollen. Technische Barrieren können ergänzende Funktionen übernehmen und zusätzliche Sicherheit bieten. Auch ist es leichter, technische Barrieren an die geologischen Verhältnisse anzupassen als nach für die technischen Barrieren geeigneten geologischen Umgebung zu suchen. Der

AkEnd hat sich deshalb im Hinblick auf das zu entwickelnde Auswahlverfahren dafür entschieden, dass zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation zu suchen ist, deren Barrierewirkung durch angepasste technische Barrieren ergänzt werden kann.

Die geologischen Verhältnisse in Deutschland sind vielfältig und zum Teil gut erforscht. Dadurch bieten sie nach Auffassung des AkEnd die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Auswahl von Regionen mit günstigen geologischen Gesamtsituationen, die auch die erforderlichen Barriereigenschaften besitzen /AAE 02/. Diesbezügliche aktuelle Einzelfragen des BMU sind in /BMU 06/ zusammengefasst.

4.4 Bewertungsmatrix

In den vorangegangenen Kapiteln sind die endlagerspezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallin näher erläutert worden. Daraus wird deutlich, dass es kein Wirtsgestein gibt, das ausschließlich positive Eigenschaften aufweist. Andererseits lässt sich auch kein Wirtsgestein von vornherein ausschließen, es kommt vielmehr auf die geologische Gesamtsituation wie auch das Zusammenwirken unterschiedlicher Barrieren im Rahmen des Mehrbarrierenkonzeptes an einem Standort an.

Basierend auf den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine sowie den grundlegenden Anforderungen an ein Wirtsgestein lässt sich eine Bewertungsmatrix erstellen, die - vorbehaltlich standortspezifischer Eignungsuntersuchungen - eine vorläufige Qualifikation unterschiedlicher Wirtsgesteine erlaubt. Gezielte Untersuchungen und Bewertungen sind beispielsweise von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) für die unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen /BRÄ 94a/, /KOC 95/ durchgeführt worden. Diese bildeten auch die Grundlage für eine Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen /BGR 06/.

In der Bewertungsmatrix werden zum einen die endlagerrelevanten Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine aufgegriffen (Tab. 29) und zum anderen - in Abgleich mit dem Vorkommen entsprechender Formationen - die für ein Endlager untersuchungswürdigen Steinsalz- und Tonsteinformationen abgeleitet.

Im Rahmen ihrer Stellungnahme zu sicherheitstechnischen Einzelfragen nimmt auch /GRU 05/ eine Bewertung der in Deutschland für die Endlagerung in Frage kommenden Geosysteme vor. Ausgangspunkt dieser geosystemaren Bewertung sind die grundsätzlichen Anforderungen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie vom AkEnd formulierte Schutzziele, die an einem Endlagerstandort zu erfüllen sind. Nach /GRU 05/ stellen Geosystemtypen mit ihrer charakteristischen, an bestimmten äußeren Merkmalen erkennbaren Ausprägung bestimmter Eigenschaften Sonderfälle einer günstigen geologischen Gesamtsituation dar. Mit Bezug auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle bilden sie Mehrbarrierensysteme, die an Hand dieser Merkmale beschrieben, gezielt aufgesucht und vergleichend beurteilt werden können.

Tab. 29 Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine (■ günstige Eigenschaft, ■ ungünstige Eigenschaft, ■ mittel) - (aus /BGR 06/, geringfügig modifiziert)

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z. B. Granit)
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ-Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Löslichkeit	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsvermögen	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

Von den Eigenschaften einer günstigen geologischen Gesamtsituation können nach /GRU 05/ die folgenden für eine solche geosystemare Beurteilung genutzt werden:

- Rückhalteeigenschaften der geologischen Barrieren
- Konfigurative Eigenschaften geologischer Barrieren (Form und Ausdehnung, Tiefenlage).

Von den Autoren /GRU 05/ wurde auf Basis des Konzepts der günstigen geologischen Gesamtsituation geprüft, ob bzw. wieweit die Geosystemtypen und die zugehörigen Mehrbarrierensysteme die Anforderungen erfüllen. Die Resultate dieser Prüfung und Bewertung sind in Abb. 31 bis Abb. 34 zusammenfassend dargestellt.

Beurteilungsaspekt Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins	Gewichtungsgruppe	WG = EG					EG + WG
		Steinsalz (flache Lagerung)	Steinsalz (Salzlapir)	Tonstein	kristalline Gesteine (Granit)	Tonstein + Wirtsgestein	
günstige hydraulische Eigenschaften EG							
geringe Gebirgsdurchlässigkeit	1	a	a	b	c	b-c	
geringe Diffusionsgeschwindigkeit	1	a	a	b	c	b-c	
günstige Konfiguration EG / WG							
große Mächtigkeit EG	1	b	a	b	?c	b	
große flächenhafte Ausdehnung EG	1	a	a	a	a	a	
günstige Anordnung EG / WG	1	-	-	-	-	a-c	
gute räumliche Charakterisierbarkeit EG							
Eigenschaften gleichmäßig verteilt	1	a	a	a	b	b	
einfacher Bauplan	1	a	c	a	b	b	
hohes Sorptionsvermögen EG							
günstiger Mineralbestand	2	c	c	a	b	a-b/c	
günstige gebirgsmech. Voraussetzungen WG	2	a	a	b	a	b/a	
gute Gasverträglichkeit WG							
geringes Wasserangebot	3	a	a	b	c	b-c	
Verhinderung Druckaufbau	3	c	c	b	a	a	
EG einschlusswirksamer Gebirgsbereich		■ b, ■ c					Bewertungsstufe (a relativ günstiger als b, b relativ günstiger als c)
WG Wirtsgestein							b-c Bewertung vom Grad der Umschließung WG durch EG abhängig
? Bewertung fraglich							b/c Bewertung von der konkreten Gesteinsausbildung EG / WG abhängig
- entfällt							

Abb. 31 Bewertungsmatrix Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers der Geosystemtypen /GRU 05/

Beurteilungsaspekte Beständigkeit und Stabilität des Rückhaltevermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins	Gewichtungsgruppe	WG = EG					EG + WG
		Steinsalz (flache Lagerung)	Steinsalz (Salzdüppel)	Tonstein	kristalline Gesteine (Granit)	Tonstein + Wirtsgestein	
Beurteilungsaspekt Beständigkeit							
geringe Neigung zu Veränderungen EG / WG							
fehlende Eigendynamik	1	a	c	a	a	a	a
geringe Empfindlichkeit → exogene Prozesse	1	c	c	a	a	a	a
geringe Neigung → Wasserwegsamkeiten EG	2	a	a	b	c	b	b
Beurteilungsaspekt Stabilität des Rückhaltevermögens (Bewertung auf Grundlage des Standard-Sicherheitsniveaus)							
gute Temperaturverträglichkeit WG / EG							
gute Temperaturstabilität	3	a	a	b/c	a	a	a
geringe thermisch induz. Sekundärpermeabilität	3	a	a	b/c	a	a	a
Keine materielle Gefährdung EG	1	c	c	a	a	a	a
Keine Erhöhung Gebirgsdurchlässigkeit EG	1	a	a	b	b	b	b
Fernwirkung Spannungsänderung EG	2	a	a	b	c	b-c	b-c
EG einschlusswirksamer Gebirgsbereich		a, b, c					
WG Wirtsgestein							
a, b, c Bewertungsstufe (a relativ günstiger als b, b relativ günstiger als c) b/c Bewertung von Gesteinszusammensetzung abhängig b-c Bewertung vom Grad der Umschließung WG durch EG abhängig							

Abb. 32 Bewertungsmatrix Beständigkeit und Stabilität des Rückhaltevermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins /GRU 05/

Bewertungsbereich Sicherheitsreserven der Geosystemtypen	Gewichtungsgruppe	WG = EG					EG + WG
		Steinsalz (flache Lagerung)	Steinsalz (Salzdüppel)	Tonstein	kristalline Gesteine (Granit)	Tonstein + Wirtsgestein	
Beurteilungsaspekt Robustheit des Geosystemtyps							
Robustheit gegen Einwirkungen von außen	1	a	c	a	b	a	a
Robustheit gegen Einwirkungen von innen	1	b	c	b	a	a	a
Beurteilungsaspekt Funktionale Unabhängigkeit der Barrieren							
Funktionale Unabhängigkeit der Barrieren	1	b-c	c	a	b	a	a
EG einschlusswirksamer Gebirgsbereich		a, b, c					
WG Wirtsgestein							
a, b, c Bewertungsstufe (a relativ günstiger als b, b relativ günstiger als c)							

Abb. 33 Bewertungsmatrix Sicherheitsreserven (Beurteilungsaspekte Robustheit, funktionale Unabhängigkeit der Barrieren) der Geosystemtypen /GRU 05/

Bewertungsbereich Bewertungssicherheit der Geosystemtypen (Beurteilungsaspekte Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit)	Gewichtungsgruppe	WG = EG					EG + WG
		Steinsalz (flache Lagerung)	Steinsalz (Galszapf)	Tonstein	Kristalline Gesteine (Granit)	Tonstein + Wirtsgestein	
Beurteilungsaspekt Charakterisierbarkeit							
Komplexität des Bauplans	1	a	c	a	b-c	b-c	
Repräsentativität von Informationen	1	a-b	c	a-b	c	b-c	
Beurteilungsaspekt Prognostizierbarkeit							
Verständnis Entstehung und Entwicklung	1	a	b-c	a	a	a-c	
Eigendynamik der Geosysteme	1	a	c	a	a	a	
geosystemtyp-unabhängige Ereignisse und Prozesse	1	a-b	c	a	a	a-b	
EG einschlusswirksamer Gebirgsbereich		a, b, c	Bewertungsstufe (a relativ günstiger als b, b günstiger als c)				
WG Wirtsgestein		b-c	Bewertung vom Bauplan bzw. vom Grad der Umschließung WG durch EG abhängig				

Abb. 34 Bewertungsmatrix Bewertungssicherheit (Charakterisierbarkeit, Prognostizierbarkeit) der Geosystemtypen /GRU 05/

Auch aus dieser Bewertung geht hervor, dass keines der untersuchten Wirtsgesteine nur vorteilhafte, aber auch keines nur nachteilige Eigenschaften aufweist. Bei allen Wirtsgesteinen stehen Vorteile bei einigen Eigenschaften Nachteilen bei anderen Eigenschaften gegenüber.

In nahezu allen Fällen lassen sich Nachteile durch einen erhöhten technischen Aufwand kompensieren. Es ergeben sich daher keine Nachteile, die grundsätzlich gegen das betreffende Wirtsgestein sprechen. Ein grundlegendes Problem, das kaum kompensiert werden kann und das eine große konzeptionelle Unsicherheit darstellt, sind dagegen die Hohlraumstabilität und Standfestigkeit bei gering konsolidierten Tonen. Hier kann, im notwendigen räumlichen Umfang, praktisch nicht auf Erfahrungen aus dem bergtechnischen oder aus anderen Bereichen zurückgegriffen werden.

5 Literatur

(Hinweis: dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur)

- /AAE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, im Auftrag des BMU, 260 S., Köln, 2002.
- /AND 99/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Référentiel géologique du site de l'est. - A RP. ADS 99-005, 1999.
- /APP 06/ Appel, D.; Kreuzsch, J.: Das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Salzstock. - Im Auftrag von Greenpeace e.V., http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/greenpeace_studie_mehrbarrierensystem_bei_salzstoerken.pdf (05.12.2006)
- /BAU 28/ Baumert, B.: Über Laugen- und Wasserzuflüsse im deutschen Kalibergbau. - Mitteilungen aus dem Roemer-Museum, Nr. 30, 1928.
- /BAU 97/ Baudoin, P. u. a.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: Everest project – Volume 4: Granite formation, site in France – two approaches – and common conclusions on granite. - EUR 17449/4 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1997.
- /BEC 04/ Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). Final Report. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 20621 EN, Luxembourg, 2004.
- /BFS 05a/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich. - Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, 189 S., Salzgitter, 2005.

- /BFS 05b/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe. -Broschüre des BfS, Salzgitter, 2005. Abrufbar unter http://www.bfs.de/bfs/druck/broschueren/Endlagerung_national.pdf (04. Dez. 2006)
- /BFS 90/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchungen Gorleben vom Mai 1983. - Bundesamt für Strahlenschutz, Bericht ET-2/90, Salzgitter, 1990.
- /BGR 06/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. - http://www.bgr.bund.de/nn_454694/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR_wirtsgest__dtl,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BGR_wirtsgest__dtl (31.10.2006).
- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben. - http://www.bgr.bund.de/cln_029/nn_454716/DE/Themen/GG__Palaeontol/Bilder/fb__gorleben__biostratigraphie__4__g.html__nnn=true (13.03.2007).
- /BMI 83/ Bundesministerium des Innern: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. - Rdschr. d. BMI v. 20.4.1983 – RS – AGK 3 – 515 790/2, 1983.
- /BMU 06/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitstechnische Einzelfragen zur Endlagerung. - http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/atomkraft_sicherheitst_einzelfragen.pdf (25.07.2006)
- /BOD 07/ Bodenmagazin: Stoffneubildung Tonminerale. - <http://www.ahabc.de/entwicklung/stoffneubildung/tonminerale.html> (13.03.2007).

- /BOR 01/ Bork, M. u. a.: Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2834, 135 S., Köln, 2001.
- /BOR 59/ Borchert, H.: Ozeane Salzlagerstätten; Grundzüge der Entstehung und Metamorphose ozeaner Salzlagerstätten sowie des Gebirgsverhaltens von Salzgesteinsmassen. - Gebr. Borntraeger, Berlin-Nikolassee, 1959.
- /BOR 88/ Bornemann, O.; Jaritz, W.; Wittrock, J.: Geotektonische Erkundung und Standsicherheitskriterien Bergwerk Gorleben, Teilprojekt I "Geologisches und geotechnisches Untersuchungsprogramm". - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tagebuch-Nr. 103750, 33 S., Hannover, 1988.
- /BRA 62/ Braitsch, O.: Die Entstehung der Schichtung in rhythmisch geschichteten Evaporiten.- International Journal of Earth Sciences, 52 (1), 1962.
- /BRÄ 94a/ Bräuer, V. u. a.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen („Kristallinstudie“). - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 112642 (Hannover), 2025039 (Berlin), 147 S., Hannover, 1994.
- /BRÄ 94b/ Bräuer, V.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein „GEISHA“ – Arbeitspaket 3: Randbedingungen Hartgestein in Deutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 112773, 54 S., Hannover, 1994.
- /BRÜ 85/ Brüggemann, R. u. a.: Modellansätze und Ergebnisse zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. - PSE-Abschlußbericht, Fachband 16, Berlin, 1985.
- /CAD 84/ Cadelli, N. u. a. (Hrsg.): PAGIS Performance Assessment of Geological Isolation Systems - Summary Report of Phase 1: A Common Methodological Approach Based on European Data and Models. - EUR 9220 EN, 154 pp., Luxembourg, 1984.

- /CEC 82/ Commission of the European Communities (CEC): Zulässige thermische Belastung in geologischen Formationen. Konsequenzen für die Methoden der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Vol. 3: Salzformationen. - EUR 08179, Luxembourg, 1982.
- /DAN 40/ D'Ans, J.; Kühn, R.: Über den Bromgehalt von Salzgesteinen der Kalisalz-lagerstätten. - Kali 34, S. 43-46, S. 59-64, S. 77-83, 1940.
- /DAN 60/ D'Ans, J.; Kühn, R.: Bemerkungen zur Bildung und zu Umbildungen ozeanischer Salzlagerstätten. - Kali und Steinsalz 3, S. 69-84, 1960.
- /DBE 98/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“. - Peine, 1998 [unveröffentlicht].
- /DIN 05/ Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. - 82 S., Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
- /DIN 87/ Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 4022, Teil 1: Baugrund und Grundwasser. Benennen und Beschreiben von Boden und Fels. Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels. - 20 S., Beuth-Verlag, Berlin, 1987.
- /FUB 08/ Freie Universität Berlin (FUB): Flutbasalte. - <http://userpage.fu-berlin.de/~allggeo/Scheuber/Magmatismus/023-Flutbasalte.html> (08.05.2008).
- /FÜC 88/ Füchtbauer, H. (Hrsg.): Sedimente und Sedimentgesteine. - 4. Aufl., 1141 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1988.
- /GEO 04/ Geozentrum Hannover: Zechstein-Gliederung, Stand 05.2004. - http://cdl.niedersachsen.de/blob/images/C38420072_L20.pdf (08.05.2008)
- /GEO 07a/ Geo- und Umweltportal Freiberg: Basaltsäulen am Scheibenberg. - http://www.gupf.tu-freiberg.de/geologie/basalt_scheibenberg.html (13.03.2007).

- /GEO 07b/ Geodienst. - <http://www.geodienst.de> (13.03.2007).
- /GIM 68/ Gimm, W. (Hrsg.): Kali- und Steinsalzbergbau, Band 1: Aufschluß und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten. - 600 S., Verlag Grundstoffindustrie, Leipzig, 1968.
- /GNS 04/ Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS): Endlagerung in Deutschland. - <http://www.endlagerung.de> (16.09.2004).
- /GNS 07/ Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS): Barrentheorie nach Ochsenius. - <http://www.endlagerung.de/generator.aspx/templateId=renderPage/lang=de/id=12482.html> (13.03.2007).
- /GOO 94/ Goodwin, B.W. u. a.: The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Post-closure assessment of a reference system. - AECL-10717, COG-93-7, 684 S., Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Pinawa, Manitoba, Kanada, 1994.
- /GRU 05/ Grundfelt, B. u. a.: Sicherheitstechnische Einzelfragen – Bedeutung des Mehrbarrierenkonzeptes für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele. - Kemakta Konsult AB, Kemakta AR 2005-28, 201 S., Stockholm, 2005.
http://www.bfs.de/transport/endlager/publikationen/AG_3_Konzeptgrund_Mehrbarrierenkonzept1.pdf (29.01.2007)
- /HAR 89/ Hartje, B.; Engelmann, H.J.; Schrimpf, C.: Repository Design for the Systems Analysis Dual-Purpose Repository. - Proc. Waste Management '89, Tucson, USA, 1989.
- /HER 00/ Herbert, H.J.: Zur Geochemie und geochemischen Modellierung hochsalinärer Lösungen mineralischer Rohstoffe. - Geologisches Jahrbuch Reihe D, Heft SD 1, 191 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2000.
- /HER 06/ Herbert, H.J. u. a.: Modellentwicklung zur Quellung hochkompakter Bentonite. - GRS-211, 103 S., Köln, 2006.

- /HER 81/ Herrmann, A.G.: Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten. - Der Aufschluß 32, S. 45-72, 1981.
- /HER 89/ Herrmann, A.G.; Knipping, B.: Stoffbestand von Salzstöcken und Langzeitsicherheit für Endlager radioaktiver Abfälle. - PTB informiert 1/89, 50 S., Braunschweig, 1989.
- /HIR 91/ Hirsekorn, R.P. u. a.: Performance Assessment of Confinements for Medium-level and α -Contaminated Waste - Pacoma Project, Rock Salt Option. - EUR 13634, Luxembourg, 1991.
- /HOR 87/ Horsemann, S.: Geotechnical characterization of Boom clay in relation to the disposal of radioactive waste. - EUR 1087 EN, Luxembourg, 1987.
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) und Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. - HSK-R-21/d, November 1993.
- /HUN 88/ Hunsche, U. u. a.: Geotechnisches Verhalten verschiedener Salzgesteine – Teilprojekt I: Langzeitverhalten von Salzgesteinen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR, Archiv-Nr. 103861, Hannover, 1988.
- /HUN 94/ Hunsche, U.; Schulze, O.: Das Kriechverhalten von Steinsalz. - Kali und Steinsalz, 11 (8/9), 1994.
- /IAE 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes. - Technical Reports Series No. 413, 80 pp., Vienna, 2003.
- /IAE 91/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Earthquakes and associated topics in relation to nuclear power plant siting. A safety guide. - Safety series No. 50-SG-S1 (Rev. 1), 60 pp., Vienna, 1991.
- /IAE 99/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste. - Technical Reports Series No. 391, 60 pp., Vienna, 1999.

- /JAS 93/ Jasmund, K.; Lagaly, G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone - Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. - 490 S., Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1993.
- /JOC 80/ Jockwer, N.: Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Carnallits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit. - Kali und Steinsalz, 8, S. 55-58, 1981.
- /JOC 81/ Jockwer, N.: Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. - Diss. Technische Universität Clausthal, 1981.
- /K+S 07a/ K+S KALI GmbH: Barrentheorie. - <http://www.kali-gmbh.com/profil/historie.cfm> (13.03.2007).
- /K+S 07b/ K+S Entsorgung GmbH: Untertage-Deponie Herfa-Neurode - Standortbrochure. - <http://www.ks-entsorgung.com/pdf/standort-neurode.pdf> (13.03.2007).
- /KÄD 78/ Käding, K.C.: Stratigraphische Gliederung des Zechsteins im Werra-Fulda-Becken. - Geol. Jb. Hessen 106, S. 123-130, 1978.
- /KAM 99/ Kamlot, P. u. a.: Untersuchungen der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (Bariton). - Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben FKZ 02E8755, 1999.
- /KEL 02/ Keller, S.: Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland) - Zusammenstellung von geologischen, klimatischen und hydrogeologischen ZEP - 1. Zwischenbericht. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tagebuch-Nr. 11846/02, 63 S., Hannover, 2002.
- /KER 80/ Kern, H.; Franke, J.H.: Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen. - Glückauf-Forschungshefte, 41. Jahrg., Vol. 6, S. 252-255, 1980.

- /KOC 95/ Kockel, F.; Krull, P. (Hrsg.): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 111089, Hannover, 1995.
- /KTA 90/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 1: Grundsätze . - Sicherheitstechnische Regel des KTA, KTA 2201.1, Fassung Juni 1990.
- /KÜH 59/ Kühn, R.: Die Mineralnamen der Kalisalze. - Kali und Steinsalz, 2, S. 331-344, 1959.
- /KÜH 72/ Kühn, R.: Zur Kenntnis der Rubidiumgehalte von Kalisalzen ozeanischer Salzlagerstätten nebst einigen lagerstättenkundlichen Ausdeutungen. - Geol. Jb. 90, S. 127-220, 1972.
- /LEY 99/ Leydecker, G., Kopera, J.R.; Rudloff, A.: Abschätzung der Erdbebengefährdung in Gebieten geringer Seismizität am Beispiel eines Standortes in Norddeutschland. - DGEB-Publikation Nr. 10, S. 89-97, 1999.
- /LUK 02/ Lukas, V.: Kali- und Steinsalz in Deutschland. - Akad. Geowiss. Hannover, Veröffentl., 20, S. 54-62, 2002.
- /MAR 99/ Marschall, P.; Fein, E.; Kull, H.; Lanyon, W.; Liedtke, L.; Müller-Lyda, I.; Shao, H.: Grimsel Test Site, Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Technical Report 99-07, Wettingen, 1999.
- /MAZ 03/ Mazurek, M.; Pearson, F.J.; Volckaert, G.; Bock, H.: Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. - OECD/NEA 4437, 376 pp., 2003.
- /MIN 07a/ Mineralienatlas: Mineralogische Beschreibung von magmatischen Gesteinen nach Streckeisen - QAPF (Quarz, Alkalifeldspat, Plagioklas, Foide). - <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/QAPF> (13.03.2007).

- /MIN 07b/ Mineralogisches Institut der Universität Münster: Kreislauf der Gesteine. - <http://www.uni-muenster.de/MineralogieMuseum/eiszeit/ice-7htm.html> (13.03.2007).
- /MIN 08/ Mineralienatlas: Zechstein. - <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Zechstein> (27.06.2008).
- /MÜL 88/ Müller, G.: Salzgesteine (Evaporite). - In: Füchtbauer, H. (Hrsg.): Sedimente und Sedimentgesteine. – S. 435-500, Verlag Schweizerbarth, Stuttgart, 1988.
- /NAG 02/: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Project Opalinus Clay - Safety Report „Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)“. - Nagra Technical Report NTB 02-05, Wetingen, 2002.
- /NAG 05/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle - Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtsgesteine und Gebiete. - Nagra Technischer Bericht NTB 05-02, 94 S., Wetingen, Schweiz, 2005.
- /NAG 85/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt Gewähr. - Nagra Gewähr Berichte NGB 85-01 bis NGB 85-09, Wetingen, 1985.
- /NOS 96/ Noseck, U.: Gegenüberstellung einiger Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Granit- und Salzformationen. - GRS-135, 79 S., Köln, 1996.
- /OND 01/ Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF/NIRAS): SAFIR 2 - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. - NIROND 2001-06 E, Brussels, 2001.

- /PAE 89/ Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken (PAE): Systemanalyse Mischkonzept (SAM) - Hauptband. - Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1989.
- /PAR 98/ Parker, A.; Rae, J.E. (Eds.): Environmental Interactions of Clays – Clays and the Environment. - 271 S., Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- /PEA 06/ Pearson, F.J.; Waber, H.N.: WS-A Experiment: Artificial Waters for use in Laboratory and field experiments with Opalinus clay. - Mont Terri Project, Technical Note 2006-26, 29 pp., 2006.
- /PEA 99/ Pearson, F.J.: WS-A Experiment: Artificial Waters for use in Laboratory and field experiments with Opalinus clay. Status June 1998. - Mont Terri Project, Technical Note 99-31, 23 pp., 1999.
- /POS 03/ Posiva Oy: Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants: Programme for research, development and technical design for 2004-2006. - TKS-2003, 294 S., Posiva Oy, Olkiluoto, 2003.
- /POS 08/ Posiva Oy: ONKALO structure. - http://www.posiva.fi/englanti/tutkimus_esittely.html (25.04.2008).
- /PUS 04/ Pusch, R.; Svemar, C. (Eds.): Cluster repository project, Deliverable D6, Comparison of repository concepts and recommendations for design and construction of future repositories. - EC 5th EURATOM Framework programme 1998-2002, EC Contract FIR1-CT-2000-20023, 2004.
- /REB 06/ Rebours, H.; Delay, J.; Vinsot, A.: Scientific investigation in deep boreholes at the Meuse/Haute Marne Underground Research Laboratory, Northeastern France. - Proceedings of the TopSeal Conference, 17-22. Sept. 2006, Olkiluoto, 2006.
- /REI 70/ Reichenbach, W.: Die lithologische Gliederung der rezessiven Folgen von Zechstein 2 - 5 in ihrer Beckenausbildung. Probleme der Grenzziehung und Parallelisierung. - Ber. dt. Ges. geol. Wiss. A15, S. 555-563, 1970.

- /RIC 55/ Richter-Bernburg, G.: Stratigraphie und Gliederung des deutschen Zechsteins.- Z. dt. geol. Ges., 105, S. 843-854, Hannover, 1955.
- /RÜB 04/ Rübel, A.; Noseck, U.; Müller-Lyda, I.; Kröhn, K.P.; Storck, R.: Konzeptioneller Umgang mit Gasen im Endlager. - GRS-205, Köln, 2004.
- /SCH 90/ Scheibel, G. u. a.: Voruntersuchung zum weiteren Vorgehen auf dem Gebiet Gebindeabsturz und Aerosolfreisetzung im Endlager. - Batelle-Institut e. V., Abschlußbericht BF R 67.347-01, Frankfurt/M., 1990.
- /SCH 91/ Schwandt, A.: Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels. - GSF-Bericht 22/91, 103 S., Neuherberg, 1991.
- /SEK 93/ Systemanalyse Endlagerkonzepte (SEK): Direkte Endlagerung. - Sammlung der Vorträge anlässlich der Abschlußveranstaltung Systemanalyse Endlagerkonzepte am 9. und 10. November 1993, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, AE Nr. 29, 1993.
- /SIN 88/ Singewald, A.: Produkte aus Rohsalzen. - Kali und Salz 10, S. 2-10, 1988.
- /SKB 99/ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Deep repository for spent nuclear fuel, SR 97 – Post-closure safety. - Technical Report TR-99-06, 119 S., Stockholm, 1999.
- /SON 84/ Sonnenfeld, P.: Brines and Evaporites. - 613 S., Verlag Academic Press, Inc. Orlando, San Diego, New York, 1984.
- /SPA 57/ Spackeler, G.: Lehrbuch des Kali- und Salzbergbaus. - 598 S., Wilhelm Kamp Verlag, Halle, 1957.
- /SPO 65/ Sponheuer, W.: Bericht über die Weiterentwicklung der seismischen Skala (MSK 1964). - Dtsch. Akad. d. Wiss., Veröff. Inst. Geodynamik, Jena, Heft 8, 117 pp., Akademie Verlag, Berlin, 1965.
- /STO 88/ Storck, R.; Aschenbach, J.; Hirsekorn, R.P.; Nies, A.; Stelte, N.: PAGIS: Disposal in Salt formations. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 11778 EN, Luxembourg, 1988.

- /THU 99/ Thury, M.; Bossart, P.: Mont Terri Rock Laboratory - Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments performed in 1996 and 1997. - Landeshydrologie und -geologie, Geological Report Nr. 23, Bern, 1999.
- /TUF 08/ Technische Universität Bergakademie Freiberg: Einaxiale Druckfestigkeitsprüfungen. - <http://tu-freiberg.de/fakult3/gt/deutsch/feme/mech-eig-p3.pdf> (25.06.2008)
- /VER 03/ Verstricht, J.; Blümling, P.; Merceron, T.: Repository concepts for nuclear waste disposal in clay formations. - Field Measurements in Geomechanics, Proc. of the 6th Int. Symp., Oslo, 15-18 September 2003.
- /VOL 96/ Volkaert, G. u. a.: Thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier in radioactive waste repositories (model development and validation). - EUR 16744 EN, Luxembourg, 1996.
- /WAL 05/ Wallner, M. u. a.: Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER) - Abschlussbericht. - DBE-Technology, 452 S., Peine, 2005.
- /WAL 89/ Wallner, M.; Stührenberg, D.: Systemanalyse Mischkonzept. Fernfeldanalysen. - Technischer Anhang 6. KWA-Nr. 3603 A3, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), 1989.
- /WIE 04/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand (ALOHA2). - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-198, 60 S., Köln, 2004.
- /WIE 98/ Wieczorek, K.; Zimmer, U.: Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2651, 86 S., Köln, 1998.

/WIT 79/ Witherspoon, P.A. u. a.: Rock Mass Characterization for Storage of Nuclear Waste in Granite. - Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-8570, Berkeley, 1979.

/ZIE 82/ Ziegler, P.A.: Geological Atlas of Western and Central Europe. - 130 S., The Hague (Shell Internationale Petroleum Maatschappij), 1982.

6 Weiterführende Literatur

(Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im "Literaturverzeichnis")

Alheid, H.J.; Knecht, M.; Lüdeling, R.: Investigation of the long-term development of damaged zones around underground openings in rock salt. - Proc. 3rd North Amer. Rock Mech. Symp. (NARMS '98), June 3-5, 1998, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Paper 027, Vol. 35, No. 4/5, Cancun/Mexico, 1998.

Anke, G.; Eisenburger, D.; Heusermann, S.; Jacob, N.; Kopietz, J.; Koss, G.; Meister, D.: Thermomechanische In-situ-Heizversuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände. - Schlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben KWA 55039, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 104770, Hannover, 1989.

Atomgesetz (10/76): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 1976 (BGBl. I, S. 3053), 1976.

Bechthold, W.; Rothfuchs, T.; Poley, A.; Ghoreychi, M.; Heusermann, S.; Gens, A.; Olivella, S.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project). Final Report. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 19124 EN, Luxembourg, 1999.

Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 20621 EN, Luxembourg, 2004.

Becker, D.A.; Bremer, N.M.; Richter, K.J.; Schneider, L.; Storck, R.: Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Endlagerungstrecken. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-164, Köln, 2000.

- Brewitz, W.; Rothfuchs, T.: German Participation in the EU Project NET.Excel - Status and Prospects of Waste Disposal Research in Rock Salt. - WM'04 Conference, February 29-March 4, 2004, Tucson, AZ, 2004.
- Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: SAM - Analysen der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. - GSF-Bericht 27/91, Technischer Anhang 7, Neuherberg, 1991.
- Castro, A.; Fernandez, C.; Vignerresse, J.L.: Understanding granites: integrating new and classical techniques. - Geological Society Special Publications, Vol. 168, p. 1-5, London, 1999.
- Cussler, E.L.: Diffusion – Mass transfer in fluid systems. - Cambridge University Press, 1997.
- Droste, J.; Feddersen, H.K.; Rothfuchs, T.: Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). Abschlussbericht. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-173, Köln, 2001.
- Fahland, S.; Heusermann, S.: Messung und Berechnung von Gebirgsspannungen im ERA Morsleben zur Beurteilung des Tragverhaltens alter Abbaufelder. - Messen in der Geotechnik 2006, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 82, S. 113-132, Braunschweig, 2006.
- Gies, H. u. a.: The HAW Project - Test Disposal of Highly Radioactive Radiation Sources in the Asse Salt Mine. Material inventory and Petrophysics of the rock salt in the HAW field (Asse, 800 m level). - GSF-Bericht 16/94E, Neuherberg, 1994.
- Gies, H.; Hild, W.; Kühle, Th.; Mönig, J.: Strahleneffekte im Steinsalz - Statusbericht. - GSF-Bericht 9/93, Neuherberg, 1993.

- Hampel, A.; Schulze, O.: The Composite Dilatancy Model: A constitutive model for the mechanical behaviour of rock salt. - Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behaviour of Salt (Eds.: Wallner, M.; Lux, K.H.; Minkley, W.; Hardy, Jr., H.R.), Hannover 2007, pp. 99-107, London (Francis & Taylor), 2007.
- Hansen, F.D.; Callahan, G.D.; van Sambeek, L.L.: Reconsolidation of salt as applied to permanent seals for the Waste Isolation Pilot Plant. - The 6th Int. Conference on Mechanical Behavior of Salt, Sep. 1993, Palaiseau, France, 1993.
- Heemann, U.; Heusermann, S.; Knowles, N.: Current Status of the Benchmark Exercise "Comparative Study on Crushed Salt (CS2)". - EC-CLUSTER Seminar "In-Situ Testing in Underground Research Laboratories for Radioactive Waste Disposal", Dec. 10-11, 1997, Alden Biesen, Belgium, 1997.
- Hein, H.J.: Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermo-mechanischen Verhaltens von Steinsalzgranulat. - Dissertation, RWTH Aachen, 1991.
- Heusermann, S.: Langzeit Spannungsmessungen im Salzgebirge - Untersuchungsergebnisse und Erfahrungen aus einem Großversuch im Forschungsbergwerk Asse. - Messen in der Geotechnik 2006, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 82, S. 133-150, Braunschweig, 2006.
- Heusermann, S.: Thermomechanical Analysis of a Large-Scale Borehole Heater Test in Rock Salt. - Numerical Models in Geomechanics (Eds.: Pande, G. N. Pietruszczak, S.), Vol. I, pp. 529-539, Rotterdam (Balkema), 1992.
- Heusermann, S.; Eickemeier, R.; Sprado, K.H.; Hoppe, F.J.: Initial Rock Stress in the Gorleben Salt Dome Measured During Shaft Sinking. - Geotechnical Measurements and Modelling (Eds.: Natau, O., Fecker, E. & Pimentel, E.), pp. 139-144, Rotterdam (Balkema), 2003.
- Heusermann, S.; Eisenburger, D.; Koppitz J.; Meister, D.: Field Measurements in a Multiple-Heater Test to Study the Thermal and Thermomechanical Response of Rock Salt. - Proc. 3rd Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics (Ed.: Sorum, G.), Vol. II, pp. 583-594, Rotterdam (Balkema), 1991.

- Heusermann, S.; Heemann, U.: In-situ measurements and 3-D model calculations of backfill compaction and EDZ development in waste disposal drifts in salt rock. - The Mechanical Behavior of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt (Eds.: Wallner, M., Lux, K.-H., Minkley, W. & Hardy, Jr., H. R.), pp. 215-222, London (Taylor & Francis), 2007.
- Heusermann, S.; Heemann, U.; Sprado, K.H.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Verhalten von Versatz in Endlagerstrecken im Salinar. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tagebuch-Nr. 10676/03, Hannover, 2003.
- Heusermann, S.; Jacob, N.: Calculation and Measurement of Stress Changes Induced in a Single-Heater Test in Rock Salt. - Proc. 6th Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics (Ed.: Swoboda, G.), Vol.3, pp. 2023-2028, Rotterdam (Balkema), 1988.
- Heusermann, S.; Koß, S.; Sprado, K.H.; Glöggler, W.: Geotechnische Untersuchungen im Rahmen des Demonstrationsversuchs „Thermische Simulation der Streckenlagerung“. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 115166, Hannover, 1996.
- Heusermann, S.; Liedtke, L.; Sönneke, J.; Sprado, K.H.; Glöggler, W.: Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Brennelementen - Teilprojekt I: Thermische Simulation der Streckenlagerung. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 113591, Hannover, 1995.
- Heusermann, S.; Schneefuß, J.: Thermal and Thermomechanical Response of Rock Salt to the Direct Disposal of Spent Fuel. - Safety and Environmental Issues in Rock Engineering (Eds.: Ribeiro e Sousa, L. & Grossmann, N. F.), Vol. 1, pp. 309-315, Rotterdam (Balkema), 1993.
- Heusermann, S.; Wallner, M.: Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Brennelementen - Teilprojekt I: Thermische Simulation der Streckenlagerung. - Bericht zum BMFT-FV KWA 36033, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 105155, Hannover, 1989.

Hirse Korn, R.P.; Nies, A.; Rausch, H.; Storck, R.: Performance Assessment of Confinements for Medium-level and α -contaminated Waste (PACOMA Project) Rock Salt Option. - GSF 127/1, Neuherberg, 1991.

Hunsche, U.; Plischke, I.; Nipp, K.H.; Albrecht, H.: An in situ creep experiment using large rock salt pillar. - 6th Int. Symp. on Salt, pp. 437-454, 1985.

Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F.; Plischke, I.: Projekt Gorleben: Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tagebuch-Nr. 11766/03, Hannover, 2003.

Jockwer, N.; Kull, H.; Wieczorek, K.: Investigations on Gas Migration, Contribution to the Gas Migration Test (GMT) at the Grimsel Test Site. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-221, Köln, 2006.

Kooistra, A.; Verhoef, P.N.W.; Broere, W.; Ngan-Tillard, D.J.M.; van Tol, A.F.: Appraisal of stickiness of natural clays from laboratory tests. - Publications of the Applied Earth Sciences, Section Engineered Geology, 1998.

Kull, H.; Herbert, H.J.: A new self sealing backfill material for repositories in salt formations. - Proceedings DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April, 2004, Berlin, pp. 489-497, 2004.

Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Köln, 2000.

Manthei, G.; Eisenblätter, J.; Kamlot, P.; Heusermann, S. (1998): Acoustic Emission Measurements in a Salt Mine Using a Special Borehole Probe. - Proc. 23th Europ. Conf. on Acoustic Emission Testing, pp. 42-47, Vienna, Austria, 1998.

Markl, G.: Minerale und Gesteine. Eigenschaften, Bildung, Untersuchung.- 355 S., Elsevier, 2004.

- Meister, D.; Jacob, N.; Anke, G.; Heidrich, D.; Sammer, K.; Heusermann, S.: Thermo-mechanische In-situ-Versuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände (Rißbildung) - Teilprojekt Gebirgsmechanik. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 98873, Hannover, 1985.
- Mönig, J.: Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-142, Köln, 1997.
- Müller, K.; Rothfuchs, T.: The HAW project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine. Documentation and appraisal of the disposal system. Topical report. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 16554 EN, Luxembourg, 1995.
- Müller-Lyda, I.: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. - Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-143, Köln, 1999.
- Müller-Lyda, I.; Birthler, H.; Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148, Köln, 1999.
- Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. - Nagra Technischer Bericht NTB 02-03, Wettingen, 2002.
- Nuclear Energy Agency (NEA): The role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes. - OECD-Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain, France, 2001.
- Olivella, S.; Carrera, J.; Gens, A.; Alonso, E.: Nonisothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Through Saline Media. - Transport in Porous Media 15, S. 271-293, 1994.

- Olivella, S.; Carrera, J.; Gens, A.; Alonso, E.: Porosity Variations in Saline Media Caused by Temperature Gradients Coupled to Multiphase Flow and Dissolution/Precipitation. - *Transport in Porous Media* 25, S. 1-25, 1996.
- Olivella, S.; Gens, A.: A constitutive model for crushed salt. - *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2002, 26, S. 719-746, 2002.
- Olivella, S.; Gens, A.; Carrera, J.; Alonso, E.: Behaviour of porous salt aggregates - Constitutive and field equations for a coupled deformation, brine, gas and heat transport model. - *The 6th Int. Conference on Mechanical Behavior of Salt*, Sep. 1993, Palaiseau, France, 1993.
- Pahl, A.; Heusermann, S.; Glöggler, W.; Müller, D.W.; Sprado, K.H.: In-situ-Meßtechnik im Salz. - Schlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben KWA 51030, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 97997, Hannover, 1985.
- Pahl, A.; Heusermann, S.; Hanisch, J.; Liedtke, L.: Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Brennelementen - Teilprojekt I: Thermische Simulation der Streckenlagerung. 5. Bericht (Schlussbericht für den Zeitraum 1986 - 1990) zum BMFT-FV KWA 3603A3, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 108589, Hannover, 1991.
- Pahl, A.; Heusermann, S.; Naujoks, A.; Glöggler, W.; Sprado, K.H.; Müller, D.W. (1988): Geotechnisches Verhalten verschiedener Salzgesteine - Teilprojekt III: In-situ-Meßtechnik im Salz. - Schlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben KWA 55028, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 103538, Hannover, 1988.
- Plischke, I.: Determination of mechanically homogeneous areas in the rock salt mass using creep properties for a classification scheme. - *Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behaviour of Salt* (Eds.: Wallner, M., Lux, K.-H., Minkley, W. & Hardy, Jr., H. R.), Hannover 2007, S. 321-326, London (Francis & Taylor), 2007.

- Plischke, I.: Langzeitverformungsverhalten an zwei Salzpfählern im Salzbergwerk Asse.
- Comptes-rendus: 9^{ième} Congrès International de Mécanique des Roches,
S. 1397-1400, 1999.
- Plischke, I.; Hunsche, U.: In situ-Kriechversuch unter kontrollierten Spannungsbedin-
gungen an großen Steinsalzpfählern. - Rock at great depth: rock mechanics
and rock physics at great depth, Proceedings ISRM-SPE Int. Symp., S.
1010-108, 1989.
- Press, F., Siever, R., Grotzinger, J., Jordan, T.H.: Understanding Earth.- 4. Auflage,
567 S. + Anhang, W.H. Freeman and Company, New York, 2003.
- Rothfuchs, T.; Duijves, K.: Das HAW-Projekt. Demonstrationseinlagerung hochradioakti-
ver Abfälle im Salzbergwerk Asse. Zwischenbericht 1985-1987. - GSF-
Bericht 10/88, Neuherberg, 1988.
- Rothfuchs, T. u. a.: CROP - Cluster Repository Project: A Basis for Evaluation and De-
veloping Concepts of Final Repositories for High-Level Radioactive Waste
– German Country Annexes. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktors-
icherheit (GRS) mbH, GRS-201, Köln, 2004.
- Rothfuchs, T. u. a.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-
Level Radioactive Waste – Phase II. Final Report. - Gesellschaft für Anla-
gen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-161, Köln, 1999.
- Rothfuchs, T. u. a.: The HAW Project: Test Disposal of Highly Radioactive Radiation
Sources in the Asse Salt Mine. Final Report. - Office for Official Publica-
tions of the European Communities, EUR 16688 EN, Luxembourg, 1995.
- Rothfuchs, T.: Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyha-
litischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen. Temperaturversuch 5 im
Salzbergwerk Asse. Abschlussbericht. - Office for Official Publications of
the European Communities, EUR 10392 DE, Luxembourg, 1986.

- Rothfuchs, T.; Dittrich, J.; Droste, J.; Müller, J.; Zhang, C.L.: Final Evaluation of the Project „Thermal Simulation of Drift Emplacement“ (TSDE-Project). Final Report. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-194, Köln, 2003.
- Rothfuchs, T.; Droste, J.; Feddersen, H.K.; Heusermann, S.; Schneefuß, J.: Spezielle Sicherheitsaspekte der Streckenlagerung - Der TSS-Versuch. - Abschlussveranstaltung Direkte Endlagerung, Forschungszentrum Karlsruhe, 7./8. Dezember 1995, Karlsruhe, 1995.
- Rothfuchs, T.; Miehe, R.; Moog, H.; Wieczorek, K.: Geoelectric Investigation of Bentonite Barrier Saturation Conducted in the Prototype Repository at the Äspö Hard Rock Laboratory. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-208, Köln, 2004.
- Rothfuchs, T.; Wieczorek, K.; Feddersen, H.K.; Staupendahl, G.; Coyle, A.J.; Kalia, H.; Eckert, J.: Brine Migration Test. Final Report. - GSF-Bericht 6/88, Neuherberg, 1988.
- Sander, W. (1999): Wirksamkeit der Abdichtung von Versatzmaterialien. – In: „Untertägige Entsorgung - Viertes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“, 14.-15. September 1999 in Clausthal-Zellerfeld. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 6, S. 315-328, Karlsruhe 1999.
- Sander, W.; Herbert, H.J.: A new hydraulic barrier – Performance of a selfhealing salt backfill material. – Proceedings DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, September 2000, Berlin, 2000.
- Sander, W.; Herbert, H.J.: Wirksamkeit der Abdichtungen von Versatzmaterialien. Abschlussbericht. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-180, Köln, 2002.
- Schlich, M.: Simulation der Bewegung im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld. - GSF-Bericht 2/86, Neuherberg, 1986.

- Schneefuß, J.; Heusermann, S.: Thermal Simulation of Drift Emplacement - Demonstration Experiment on Direct Disposal in the Asse Salt Mine. - Int. Symp. on Geological Disposal of Spent Fuel, High-Level, and Alpha-Bearing Wastes, October 19-23, 1992, Antwerp, Belgium, 1992.
- Schulze, O.; Heemann, U.; Zetsche, F.; Hampel, A.; Pudewills, A.; Günther, R.M.; Minkley, W.; Salzer, K.; Hou, Z.; Wolters, R.; Rokahr, R.; Zapf, D.: Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behavior of rock salt - results from a joint research project. I. Modeling of deformation processes and benchmark calculations. - Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behaviour of Salt (Eds.: Wallner, M., Lux, K.-H., Minkley, W. & Hardy, Jr., H. R.), Hannover 2007, pp. 77-88, London (Francis & Taylor), 2007.
- Spiers, C.J. u. a.: Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. - Geological Society Special Publication No 54. S. 215-227, 1990.
- Spiers, C.J.; Grupa, J.; Salzer, K.; Topp, T.; Stührenberg, D.: Buffer / backfill in salt. - Presentation in NFPRO second training course and workshop, 19-20 Oct. 2005, Cardiff, Wales, UK, 2005.
- Spiers, C.J.; Peach, C.J.; Brzesowsky, R.H.; Schutjens, P.M.T.M.; Liezenberg, J.L.; Zwart, H.J.: Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 11848 EN, Luxembourg, 1989
- Spies, T.; Hesser, J.; Eisenblätter, J.; Eilers, G.: Monitoring of the rock mass in the final repository Morsleben: experiences with acoustic emission measurements and conclusions. – Proceedings DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26–28 April, 2004, Berlin, pp. 303-311, 2004.
- Stockmann, N. u. a.: Dammbau im Salzgebirge. Abschlussbericht Phase II. - GSF-Bericht 18/94, Neuherberg, 1994.

Stührenberg, D.: Compaction and Permeability Behaviour of Crushed Salt and Mixtures of Crushed Salt and Bentonite. - Proceedings DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26–28 April, 2004, Berlin, S. 511-515, 2004.

Stührenberg, D.: Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tagebuch-Nr. 11 145/2000, Hannover, 2002.

Stührenberg, D.: Long-term laboratory investigation on backfill. – Proc. of the 6th Conf. on the Mech. Behaviour of Salt (Eds.: Wallner, M., Lux, K.-H., Minkley, W. & Hardy, Jr., H. R.), Hannover 2007, pp. 223-230, London (Francis & Taylor), 2007.

Stührenberg, D.; Zhang, C.L.: Projekt Gorleben - Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 116 922, Hannover, 1998.

Stührenberg, D.; Zhang, C.L.: Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus als Versatzmaterial für Endlagerbergwerke im Salz unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Gebirge und Versatz. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 113 259, Hannover, 1995.

Tucker, M.E.: Sedimentary Petrology. - 3rd edition, 272 pp., Blackwell Publishing, 2001.

Uhlig, L. u. a.: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - Abschlussbericht. - DBE Technology GmbH, 84 S., Peine 2007.
<http://www.dbetec.de/fileadmin/dbetec/downloads/Generisches%20Endlager%20im%20Tonstein.pdf> (06.05.2008)

Wieczorek, K.; Miehe, R.: Barriereverhalten von Anhydrit, Phase 2 (BARIANO) Untersuchungen bei großräumigen Spannungumlagerungen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-209, Köln, 2005.

Wieczorek, K.; Zimmer, U.: Untersuchungen zur Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar (ALOHA2). - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-198, Köln, 2004.

Winter, J.D.: An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology.- Prentice Hall, New Jersey, 2001.

Zhang, C.L.; Heemann, U.; Schmidt, M.; Staupendahl, G.: Experimental and modelling results for compaction of crushed salt. - The 6th Int. Conference on Mechanical Behavior of Salt, Sep. 1993, Palaiseau, France, 1993.

Zhang, C.L.; Rothfuchs, R.; Jockwer, N.; Wieczorek, K.; Dittrich, J.; Müller, J.; Hartwig, L.; Komischke, M.: Thermal Effects on the Opalinus Clay – A Joint Heating Experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terri URL (HE-D Project). - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-224, Köln, 2006.

Zhang, C.L.; Stührenberg, D.: Compaction and its Effect on the Permeability of Crushed Salt with added Brine or Bentonite. - The 6th Int. Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Oct. 1997, Singapore, 1997.