

## **Geowissenschaftliche Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle (vorgetragen von V. Bräuer)**

Volkmar Bräuer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2,  
30655 Hannover

### **Abstract**

Nach dem deutschen Entsorgungskonzept sollen die bei der Stromerzeugung in Kernkraftwerken anfallenden hoch radioaktiven Abfälle konzentriert und isoliert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Einer günstigen geologischen Gesamtsituation mit einem geeigneten Wirts- und Barrieregestein kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Seit 1979 wird in diesem Zusammenhang der Salzstock Gorleben untersucht, allerdings wurden die Arbeiten auf Grund eines Moratoriums für einen Zeitraum von mindestens drei bis maximal zehn Jahren unterbrochen.

Zur Vervollständigung des Kenntnisstandes über potenzielle Endlagerwirtsgesteine in Deutschland hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) je einen Katalog für die Salz-, Kristallin- und Tongesteinsvorkommen veröffentlicht. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung auch international untersucht. Dies dient auch dazu, die nationalen Untersuchungsergebnisse abzusichern. Die internationalen Projekte bilden zudem eine hervorragende Basis für Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagersystemen, die zukünftig einen Schwerpunkt der deutschen Arbeiten bilden werden.

### **Einleitung**

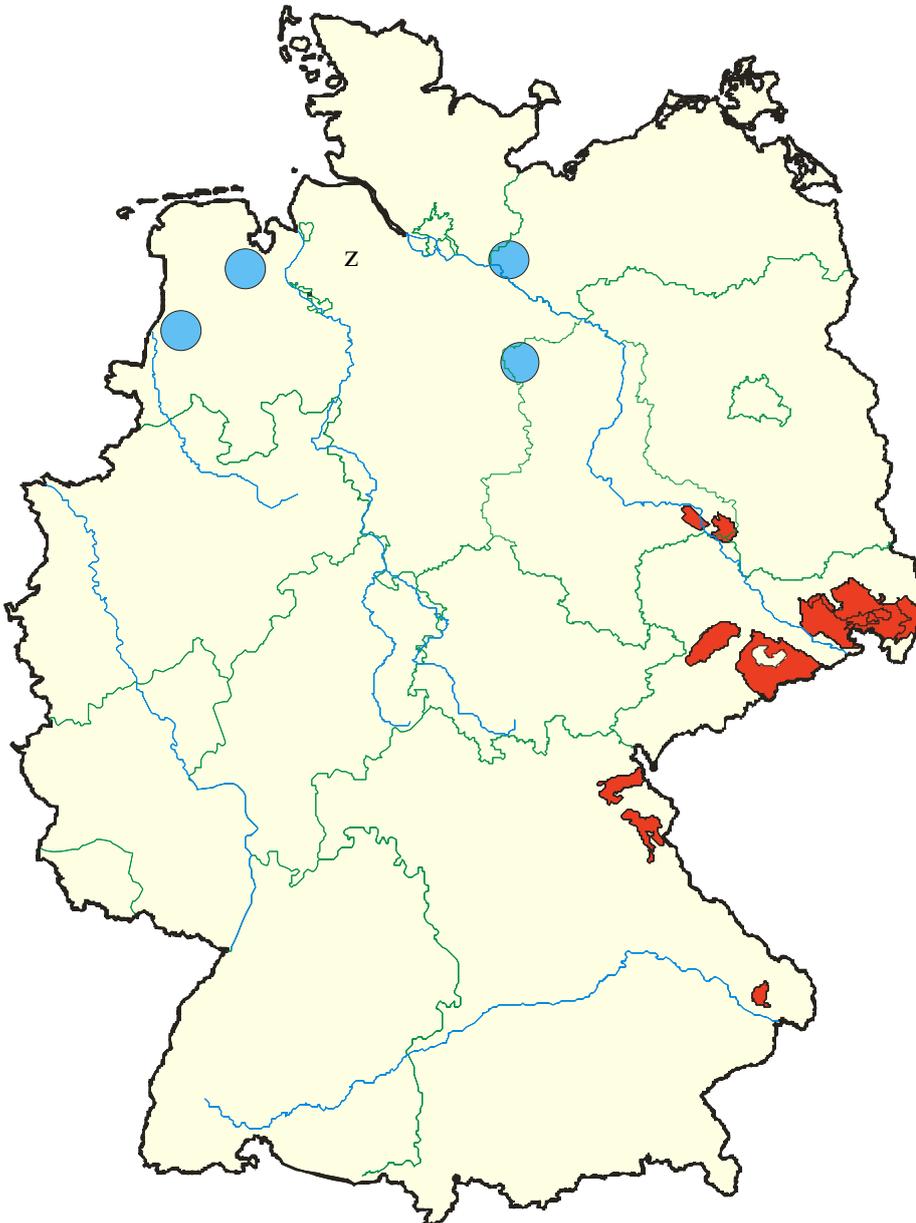
Die Frage der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist seit vielen Jahren ein international intensiv diskutiertes Thema. Laut einer Umfrage halten in Deutschland etwa 80 % der Bevölkerung die Lösung der „Endlagerfrage“ für eine dringliche Aufgabe. Dies wird auch durch Umfrageergebnisse aus dem Jahr 2005 in der Europäischen Gemeinschaft bestätigt (EUROBAROMETER 2005).

Während in einigen Ländern schon Endlager für mittel- und schwach-radioaktive Abfälle existieren, gibt es weltweit noch kein entsprechendes Endlager für den hoch aktiven und Wärme entwickelnden Abfall. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden international auch unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung untersucht. In vielen Ländern spielen dabei die jeweiligen nationalen geologischen Gegebenheiten eine wesentliche Rolle.

### **Wirtsgesteinsstudien in Deutschland**

Zur Frage der möglichen Endlagerwirtsgesteine in Deutschland hatte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) je einen Katalog für die Salz- und Kristallinvorkommen veröffentlicht, deren Ergebnisse auch heute noch aktuell sind und Gültigkeit haben (KOCKEL & KRULL 1995, BRÄUER et al. 1994).

Als Ergebnis wurden dabei Salzstöcke und Regionen mit Kristallinvorkommen in Deutschland ausgewiesen, die als weiter untersuchungswürdig eingestuft wurden. Die Untersuchungen stützten sich auf Literatur-, Archiv- und Bohrungsdaten. Feldmessungen wurden nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der Studien wurden am 28. August 1995 im Rahmen einer Pressekonferenz von der damaligen Bundesumweltministerin Dr. Merkel der Öffentlichkeit vorgestellt.



**Abb. 1:** Untersuchungswürdige Regionen in salinaren (blau) und kristallinen (rot) Formationen Deutschlands (BGR 1995)

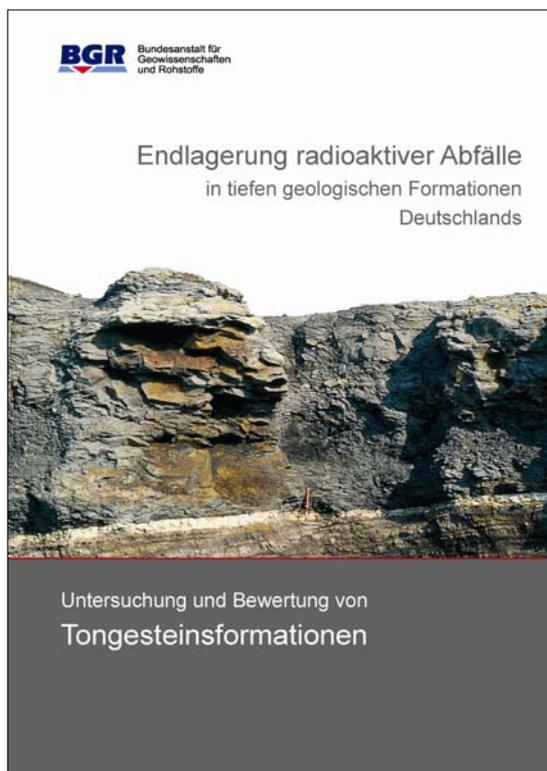
Die BGR erhielt im Jahre 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) den Auftrag, in Ergänzung zu den Untersuchungen zu Steinsalz und Kristallingesteinen, eine Studie über die Verbreitung von Tongesteinen als potenzielle

Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland zu erstellen (HOTH et al. 2007).

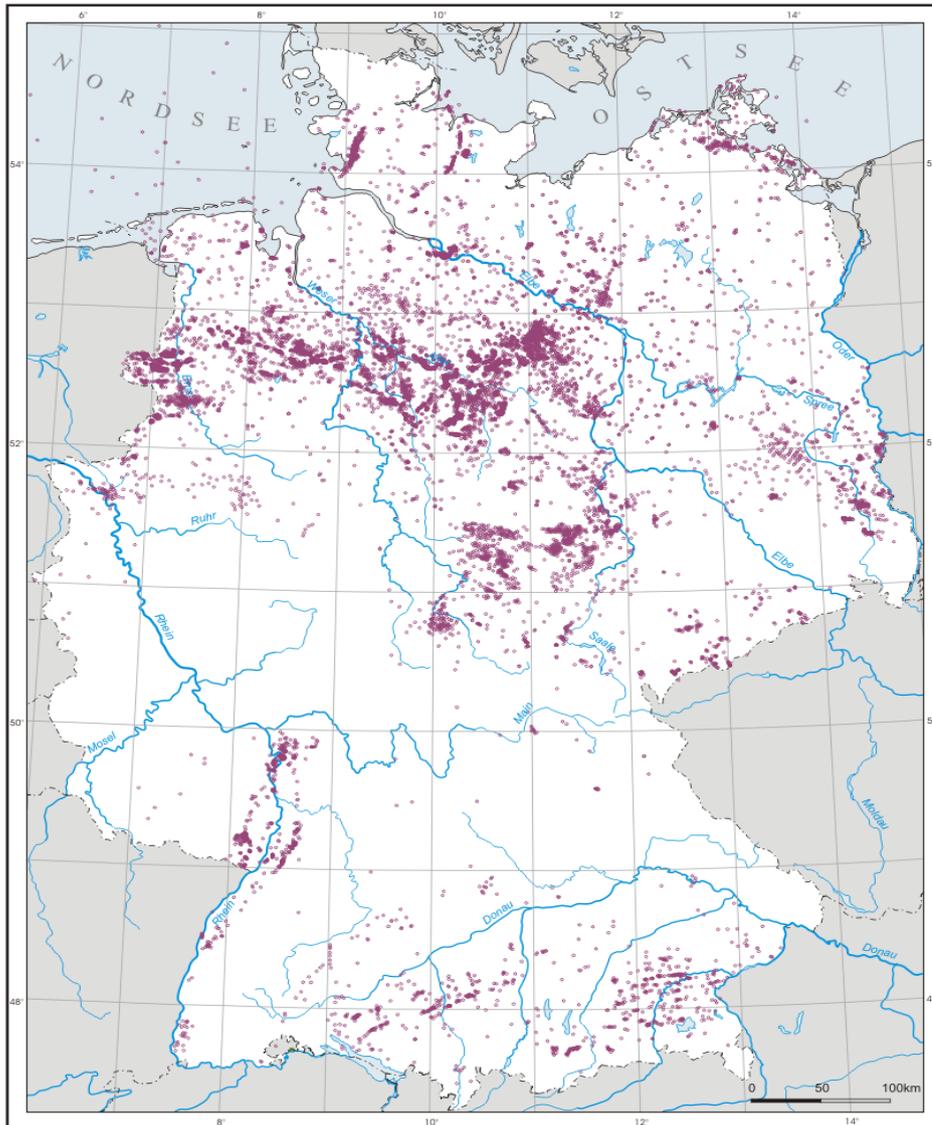
Bei den für Tongesteine durchgeführten Untersuchungen dienten international anerkannte, von der BGR für die Wirtsgesteine Salz und Kristallin formulierte Ausschluss- und Abwägungskriterien als Grundlage. Sie wurden ergänzt durch die im Jahr 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte aufgestellten wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (AkEnd 2002). Zusätzlich wurden von der BGR weitere, aus geowissenschaftlicher Sicht als maßgeblich erachtete, Abwägungskriterien bei der Auswahl der Regionen herangezogen.

Das Konzept der Endlagerung in geologischen Formationen setzt generell eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Strecken voraus. Besonders in tieferen Bereichen kann die Standsicherheit der Strecken in Tongesteinen nur mit Ausbaumaßnahmen erreicht werden. Bei unverfestigten Tonen sind diese Maßnahmen besonders aufwändig und kostspielig. Daher wurden nur verfestigte Tongesteine in die Betrachtung der BGR einbezogen. Endlagerrelevante Forschungsergebnisse von mineralogischen, geochemischen und geotechnischen Untersuchungen an Tongesteinen in internationalen Felslabors wurden ergänzend berücksichtigt.

Grundlage der im Rahmen der BGR-Tonstudie durchgeführten Beurteilung von Tongesteinsformationen im tieferen Untergrund Deutschlands waren etwa 25.000 Bohrungen, die im Rahmen der Erdöl-, Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundung sowie in geringerem Umfang als Forschungs- und Kartierungsbohrungen abgeteuft und ausgewertet wurden. Die Informationen zu den Bohrungen liegen in der BGR, dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie anderen staatlichen Geologischen Landesdiensten vor.



**Abb. 2:** „Tonstudie“ der BGR

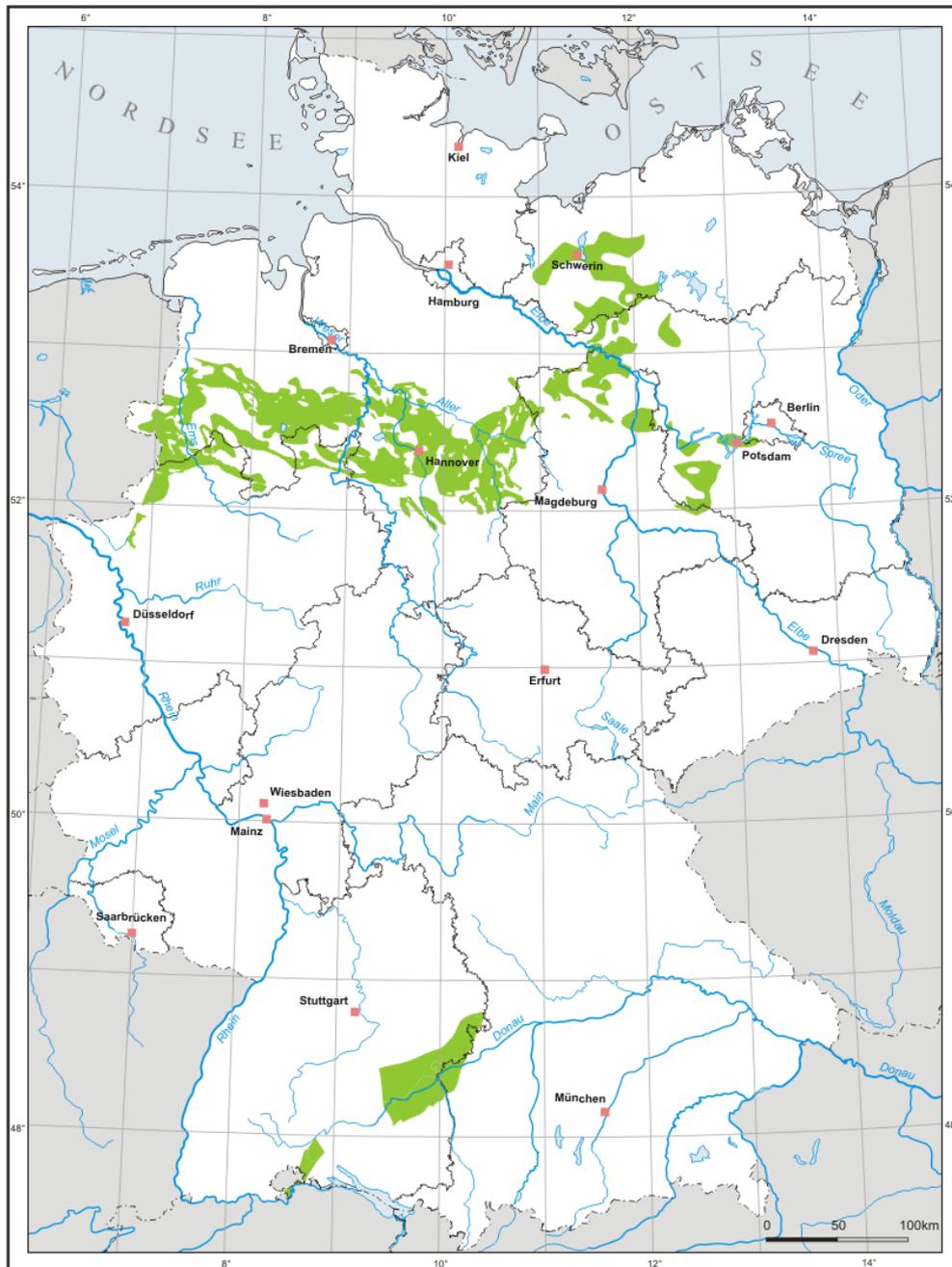


**Abb. 3:** Karte der Bohrungen (ca. 25 000) im Tiefenbereich >300 m (aus der „Tonstudie“ der BGR)

Lücken durch nicht zur Verfügung stehende digitale Datensätze wurden durch die Erfassung von Daten in anderen Formaten geschlossen. Dies betrifft einerseits nicht vorhandene Detailinformationen zu den Tongesteinsformationen und andererseits aber auch die Auswertung von tieferen Bohrungen mit anderem Erkundungsziel (z.B. Geothermie, Erzerkundung). Zusätzlich zu den Bohrungsdaten wurden die Ergebnisse wichtiger seismischer Profilmessungen mit einbezogen, sie bildeten zum Beispiel eine wichtige Grundlage für die Erfassung und Charakterisierung von Störungen und deren Tiefenreichweite. Auch die Korrelation von geophysikalischen Messergebnissen ermöglichte eine weitgehende Erfassung von endlagerrelevanten Parametern.

Die BGR-Tonstudie lieferte als Ergebnis keine Darstellung von Endlagerstandorten. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass mächtige und homogene Tongesteine, welche die Mindestanforderungen an Endlagerwirtsgesteine erfüllen, in der Unterkreide sowie in Gesteinen des Unter- und Mitteljura Norddeutschlands auftreten. In Süddeutschland

konnten stärker regional begrenzt Gesteine des Mitteljuras als untersuchungswürdig ausgewiesen werden. Die Tonformationen des Tertiärs wurden dagegen wegen ihrer ungünstigen mechanischen Eigenschaften in der BGR-Studie nicht weiter betrachtet.



**Abb. 4:** Untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Deutschland (BGR 2007)

Geografisch und raumordnerisch gesehen liegen die ausgewiesenen Teilgebiete vor allem in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg und untergeordnet auch in Brandenburg und Nordrhein-Westfalen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass eine weitere Eingrenzung der ausgewiesenen Teilgebiete im Sinne einer Standortauswahl nur mit einem sehr aufwändigen Erkundungsprogramm möglich ist.

## Eigenschaften von Steinsalz

International werden im Rahmen der einzelnen Endlagerkonzepte im Wesentlichen Tongesteine, Steinsalz und Kristallingesteine als mögliche Endlagerwirtsgesteine untersucht. Schon Ende der 50-iger Jahre gab es in Deutschland Überlegungen über die Endlagerung in Salzgesteinen. Aufgrund jahrzehntelanger Forschung und über hundertjähriger Erfahrung im Salzbergbau wurde inzwischen ein umfangreiches Wissen zu den endlagerrelevanten Eigenschaften von Steinsalz und Salzformationen erarbeitet.

<i>Eigenschaft</i>	<i>Steinsalz</i>	<i>Ton/Tonstein</i>	<i>Kristallingestein (z. B. Granit)</i>
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
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

günstige Eigenschaft
  ungünstige Eigenschaft
  mittel

**Abb. 5:** Eigenschaften möglicher Wirtsgesteine in Deutschland

Unter natürlichen Lagerungsbedingungen ist Steinsalz praktisch undurchlässig gegenüber Gasen und Flüssigkeiten. Steinsalz besitzt zudem eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie viskoplastische Eigenschaften, die zum Verschluss von Hohlräumen im Gebirge führen. Aufgrund dieser günstigen Eigenschaften ist Steinsalz insbesondere als Wirtsgestein für Wärme entwickelnde hochaktive Abfälle (HAW) sehr gut geeignet.

## **Eigenschaften von Kristallingesteinen**

Neben den Salzformationen wurden im Rahmen der BGR-Studien Kristallinvorkommen in ihrer räumlichen Ausdehnung und ihren spezifischen Eigenschaften in Deutschland untersucht. Kristallingesteine (Granite und metamorphe Gesteine) zeichnen sich besonders durch ihre hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre geringe Temperaturempfindlichkeit aus. Auch ihr sehr geringes Lösungsverhalten ist für die Endlagerung günstig. Während die Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im ungeklüfteten Zustand meist sehr gering ist, weisen diese Gesteine im geklüfteten Zustand deutlich höhere bis sehr hohe Durchlässigkeiten auf. In diesem Fall ist der dichte Einschluss der Abfälle nur durch Hinzuziehung geeigneter, technischer Barrieren (Behälter, Bentonit-Versatz) zu gewährleisten.

## **Eigenschaften von Tongesteinen**

Tongesteine weisen eine Bandbreite, vom plastischen Ton mit Übergangsformen bis zum stark verfestigten und z. T. geklüfteten Tonstein, auf. Dabei können erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten, der Temperaturempfindlichkeit und der Gebirgsstabilität auftreten. Die bisher bekannten, für die Endlagerung günstigen Eigenschaften der Tongesteine sind insbesondere die sehr geringe Durchlässigkeit und die hohe Sorptionsfähigkeit. Tongesteinsformationen haben als abdeckende, dichte Schichten z. B. für Kohlenwasserstoff-Vorkommen ihre langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere nachgewiesen.

## **Konsequenzen für die Endlagerkonzepte**

Als Konsequenz der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften sind die Endlagerkonzepte im Steinsalz, in Tongesteinen und in Kristallingesteinen ebenfalls unterschiedlich. Das Endlagerkonzept für Steinsalz basiert aufgrund der Undurchlässigkeit und der Kriecheigenschaften des Steinsalzes auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle. Im Hinblick auf die Qualität der Bewertung zugrunde liegenden Daten gilt generell, dass die standortspezifischen Kenntnisse über die Steinsalzvorkommen in Deutschland im Vergleich zum Kenntnisstand über Tongestein- und Kristallinvorkommen wesentlich größer sind. Eine umfassende Wissensbasis der Eigenschaften der Salzgesteine sowie erprobte Erkundungsmethoden und -verfahren sind vorhanden.

Im Vergleich zu Steinsalz sind die Kenntnisse über Tongesteinsformationen u. a. auch wegen der geringen Bergbauerfahrung geringer. Beim Endlagerkonzept mit Tongesteinen als Wirtsgestein darf die durch die Abfallwärme hervorgerufene maximale Gebirgstemperatur wegen der möglichen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften der Tonminerale insbesondere infolge von Mineralumbildungen eine Temperatur von 100 °C nicht überschreiten (zum Vergleich Steinsalz: 200 °C). Dies bedingt eine längere Zwischenlagerzeit, ein für Deutschland neu zu entwickelndes Endlagerkonzept mit einem wesentlich erhöhten Platzbedarf sowie ein neues Behälterkonzept. In Tongesteinen sind zudem Sicherungsmaßnahmen (Spritzbeton, Ankerung und evtl. Ausbau) für die untertägigen Hohlräume notwendig, wobei dann die Gasbildung und das veränderte chemische Milieu zu berücksichtigen sind.

Kristallingesteine besitzen eine sehr hohe Festigkeit. Untertägige Hohlräume sind daher für den Betrieb von Zugangs- und Einlagerungsstrecken in der für die Endlagerung relevanten Tiefe im Allgemeinen ohne Ausbau standsicher. Obwohl kristalline Gesteine

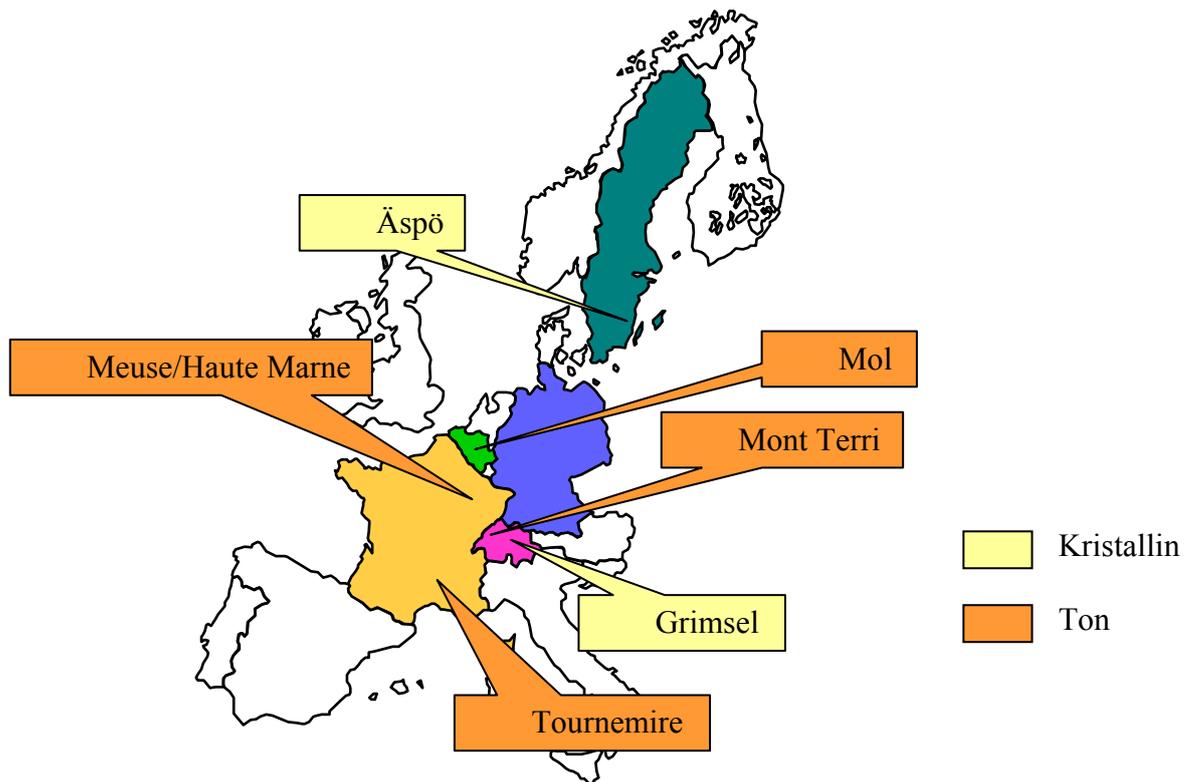
selbst keine hohen Temperaturempfindlichkeiten aufweisen, gelten die Einschränkungen in Bezug auf die maximal mögliche Temperaturbelastung wie bei den Tongesteinen, da die Einlagerungsstrecken mit Bentonit als zusätzliche Barriere versetzt werden müssen. Dies bedingt im Vergleich zur Einlagerung in Steinsalz einen erheblich höheren Platzbedarf und Aufwand.

Endlagerkonzept	Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 – 1200 m
Lagerungstechnik	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Temperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C
Versatzmaterial	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30 – 40 Jahre	min. 30 – 40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	in stark geklüfteten Bereichen erforderlich
Behälterkonzepte	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

**Abb. 6:** Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

### Internationale Forschungsarbeiten zur Endlagerung

International sind deutsche Forschungseinrichtungen in die Untersuchungen in zahlreichen Untertage-Laboratorien eingebunden, z. B. in Frankreich (Meuse/Haute Marne), in der Schweiz (Mt. Terri, Grimsel) und in Schweden (Äspö). Ziel dabei ist es, Erkenntnisse über die unterschiedlichen Wirtsgesteine zu erlangen und Methoden für die Untersuchungen im eigenen Land zu entwickeln. Der dabei notwendige große Aufwand dient auch dazu, die eigenen Untersuchungsergebnisse international abzusichern. Die internationalen Projekte bilden eine hervorragende Basis um die Schwerpunkte der deutschen Endlagerforschung, die zukünftig im Wesentlichen in Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagersystemen liegen und die die weitere Charakterisierung von Tongesteinen als Alternative zu Steinsalz als Wirtsgestein zum Thema haben, zu bearbeiten.



**Abb. 7:** Die Untertage-Laboratorien mit Beteiligung der BGR

### Ausblick

Obwohl die Untersuchungen und Forschungsarbeiten auf dem Weg zu einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle schon sehr weit gediehen sind, ist die Frage der Standortbestimmung nur in den wenigsten Ländern weit fortgeschritten. In Deutschland ist dies im Wesentlichen damit begründet, dass die für die Bestimmung eines Standortes notwendigen politischen Entscheidungen nicht getroffen wurden und auch weiter ständig verschoben werden. Dieser politisch bedingte Stillstand bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle wird in der Öffentlichkeit dergestalt interpretiert, dass für politische Entscheidungen offensichtlich noch keine ausreichenden wissenschaftlich-technischen Lösungen vorliegen. Um diesem Trugschluss entgegen zu treten, sollte es daher Aufgabe der Politik sein, die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse aufzugreifen und auch dem dringenden Wunsch der Öffentlichkeit nachzukommen, die Lösung der Endlagerfrage zügig anzugehen.

### Literatur

AKEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte).- 260 S., Köln.

Bräuer, V.; Reh, M.; Schulz, P.; Schuster, P.; Sprado, K.-H. (1994): Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen - 142 S., BGR, Hannover.

Eurobarometer (2005): "Radioaktive Abfälle", Eurobarometer Spezial 227/ Wave 63.2  
- TNS Opinion & Social.

Hoth, P.; Wirth, H.; Reinhold, K.; Bräuer, V.; Krull, P.; Feldrappe, H. (2007):  
Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen – Untersuchung und  
Bewertung von Tongesteinsformationen - 118 S., BGR, Hannover, Berlin.

Kockel, F.; Krull, P. (1995): Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen  
geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von  
Salzformationen - 66 S., BGR, Hannover, Berlin.