

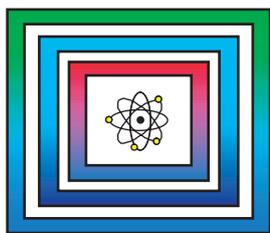
F+E Endlagerung

9Y3215080000

EUGENIA

Teil I:

Grundlagen und Beispiele für
Standortauswahlverfahren
für HAW-Endlager
in unterschiedlichen
Wirtsgesteinstypen



Abschlussbericht

Hannover, Mai 2009

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten
für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen
(EUGENIA)

Teil I

Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-
Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen

Autoren:	Hammer, Jörg, Dr. Sönke, Jürgen Mingerzahn, Gerhard
Auftraggeber:	BMWi
Auftragsnummer:	9Y3215080000
Datum:	20.05.2009
Tagebuchnummer:	10593/09
TK-Nummer:	2363 (Blattname)

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	3
1 Vorwort	4
2 Endlager-relevante Wirtsgesteinseigenschaften	5
2.1 Wirtsgesteinsunabhängige Eigenschaften	6
2.2 Steinsalz	7
2.3 Tongesteine	15
2.4 Kristallingesteine	24
2.5 Einfluss der Wirtsgesteinseigenschaften auf die Endlager- konzepte	34
3 Standortanforderungen und Auswahlkriterien für Endlager- standorte	40
3.1 Wirtsgesteinsunabhängige geowissenschaftliche Ausschluss- kriterien und Mindestanforderungen	42
3.2 Zusätzliche, weitgehend wirtsgesteinsunabhängige geowissenschaftliche Standortauswahlkriterien	46
3.3 Wirtsgesteinsabhängige Standortanforderungen - Abwägungskriterien	52
3.3.1 Spezielle Anforderungen an Standorte im Steinsalz	53
3.3.2 Spezielle Anforderungen an Standorte im Tongestein	55
3.3.3 Spezielle Anforderungen an Standorte in Kristallingesteinen	59
4 Beispiele für Standortauswahlverfahren	62
4.1 Finnland	62
4.2 Schweden	70
4.3 Frankreich	76
4.4 Schweiz	84
4.5 Deutschland	94
4.5.1 Standortauswahlverfahren des Bundes (1973 – 1976)	98
4.5.2 Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen (1976 – 1977)	109
4.6 USA	119
5 Zusammenfassung und Bewertung	128
Literaturverzeichnis	133
Abkürzungsverzeichnis	152
Abbildungsverzeichnis	156

Gesamtblattzahl: 161

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Hammer, Jörg, Dr. Sönke, Jürgen Mingerzahn, Gerhard
Titel:	Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW- Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen
Stichwörter:	Auswahlkriterien, Barriereigenschaften, Endlagerung, Standortanforderungen, Standortauswahl, Wirtsgesteine

Im vorliegenden Bericht werden die Grundlagen und Beispiele für weit fortgeschrittene Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen dargestellt. Dabei bildet die detaillierte Analyse der Endlager-relevanten Eigenschaften der Wirtsgesteine Salz, Ton/Tonstein und Kristallin die Ausgangsbasis für die Ableitung der geowissenschaftlichen Standortanforderungen bzw. -auswahlkriterien und für die Entwicklung der gesteinspezifischen Endlagerkonzepte.

Die im Bericht enthaltene Zusammenstellung der wirtsgesteinsunabhängigen und gesteinspezifischen Standortanforderungen und Auswahlkriterien basiert auf einer Analyse der weltweit im Rahmen von Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager genutzten Sicherheitsanforderungen.

Ausführlicher werden die Rahmenbedingungen und die Einflussfaktoren auf die Standortauswahl sowie der zeitliche Ablauf der Auswahlverfahren für die Länder Finnland, Schweden, Frankreich, Schweiz, Deutschland und USA dargestellt. Besonders detaillierte Informationen wurden für das ab 1963 vorbereitete und in den 1970er Jahren in Deutschland durchgeführte Standortsuchverfahren für ein HAW-Endlager zusammengestellt.

1 Vorwort

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bearbeitet als zentrale Institution der Bundesregierung auf dem Gebiet der Geowissenschaften im Rahmen von Endlagermaßnahmen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) geowissenschaftliche und geotechnische Aufgabenstellungen bei der Erkundung von Endlagerstandorten in Deutschland. Als nachgeordnete Bundesoberbehörde im Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) untersucht die BGR in Form von grundlagenorientierter Forschung in den Endlagerprojekten geowissenschaftliche und geotechnische Fragestellungen. Insbesondere werden Untersuchungen zur Verbreitung von Wirtsgesteinen, zur geologischen Standorterkundung, zur gesteinsphysikalischen Charakterisierung des Wirtsgesteins, zur Beurteilung der Wirksamkeit geologischer und geotechnischer Barrieren und zur Analyse von zukünftigen Szenarien für die Langzeitsicherheit durchgeführt.

Innerhalb des durch den Projektträger des BMWi für Wassertechnologie und Entsorgung finanzierten Forschungsvorhabens „Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA)“ analysierte die BGR gemeinsam mit DBE Technology den aktuellen Kenntnisstand zum Einfluss unterschiedlicher Wirtsgesteinseigenschaften auf die Standortauswahl und -erkundung, auf die Entwicklung gesteins- und standortspezifischer Endlagerkonzepte sowie auf den Bau, Betrieb und Verschluss von Endlagerbauwerken. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Kooperation beschäftigte sich die BGR schwerpunktmäßig mit der Zusammenstellung und Analyse von Daten zu den endlagerrelevanten Wirtsgesteinseigenschaften, den Auswahlkriterien und Anforderungen an HAW-Endlagerstandorte sowie den Methoden der Suche und Erkundung von Endlagerstandorten in den Wirtsgesteinen Salz, Ton/Tonstein und Kristallin. Der vorliegende Bericht stellt den ersten Teil der Ausarbeitungen dar. In einem zweiten Forschungsbericht (HAMMER et al. 2009) wurden ausführliche Informationen und Anwendungsbeispiele zu den bei der Standortsuche sowie der über- und untertägigen Standorterkundung eingesetzten Untersuchungsverfahren zusammengetragen. Die im Forschungsprojekt EUGENIA gesammelten Erkenntnisse und Daten bilden eine Grundlage für die Beurteilung unterschiedlicher Wirtsgesteinsoptionen und für die Planung von Standortsuch- und -erkundungsarbeiten.

2 Endlager-relevante Wirtsgesteinseigenschaften

Weltweit werden Endlagerprojekte in verschiedenen Gesteinstypen geplant bzw. bereits realisiert. Verantwortlich für die Entwicklung von Endlagerkonzepten für unterschiedliche Gesteinstypen sind die länderspezifischen geologischen Gegebenheiten, wie z. B. die Verbreitung sowie die Zusammensetzung und die Eigenschaften der prinzipiell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeigneten Gesteinsformationen, sowie national unterschiedliche Festlegungen zum Prozedere und zu den Rahmenbedingungen der Standortsuche im Vorfeld des Auswahlprozesses (siehe Kap. 4). Am häufigsten werden Vorkommen von Tongesteinen, Salzformationen und Kristallingesteine bezüglich ihrer Eignung als Endlager-Wirtsgesteine untersucht. Für alle genannten Gesteinstypen wurde unter Zugrundelegung weitgehend generischer Modellvorstellungen oder z. T. konkreter Standortdaten die prinzipielle Möglichkeit einer langzeitsicheren Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bei vollständiger Erfüllung der Schutzziele nachgewiesen (siehe z. B. WITHERSPOON & BODVARSSON 2001, 2006, PUSCH 2008).

Die für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vorgesehenen Gesteinstypen verfügen über unterschiedliche Endlager-relevante Eigenschaften. Die genaue Kenntnis dieser Gesteinsparameter ist aufgrund möglicherweise daran gebundener Einschränkungen in den Barriereigenschaften sowohl für die Standortsuche und -erkundung als auch für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes notwendig. Die Wirtsgesteinseigenschaften bestimmen die Vorgehensweise und die Untersuchungsmethoden bei der Standortcharakterisierung bzw. -auswahl und beeinflussen entscheidend die Auslegung der technischen und geotechnischen Barrieren. So erfordern z. B. die unterschiedlichen thermischen Wirtsgesteinseigenschaften (u. a. die Temperaturleitfähigkeit bzw. -empfindlichkeit) verschiedenartige Endlagerbehälter und haben deutlich unterschiedliche Behälterstandzeiten in den Zwischenlagern zur Folge. Ungünstige Wirtsgesteinseigenschaften müssen im Verlaufe der Standortcharakterisierung detaillierter erkundet und ggf. im Einlagerungs- und Verschlusskonzept in ihren langzeitlichen Auswirkungen eingeschränkt oder kompensiert werden. Auf der Grundlage der möglichst detailliert im Rahmen der Standorterkundung erfassten Gesteinseigenschaften erfolgt im standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweis eine genaue Bewertung der Barrierewirkung des geologischen Umfeldes des Endlagers.

Die Analyse der Barriereigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteinstypen wird weltweit in Untertagelabors oder Erkundungsbergwerken sowie in geotechnischen bzw. mineralogisch-geochemischen Laboruntersuchungen und im Rahmen von Analogastudien vorgenommen. Die mit großem Aufwand durchgeführten Untersuchungen dienen teilweise zum generischen, vor allem aber zum standortbezogenen Nachweis der langzeitsicheren Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen.

Die Arbeiten in verschiedenen Wirtsgesteinen sind nicht darauf ausgerichtet, das „sicherste“ Endlager-Wirtsgestein zu finden. Die aufgrund von unterschiedlichen geologischen oder raumordnerischen Voraussetzungen international in den Gesteinstypen Salz, Tonstein und Kristallin realisierten Endlagerprojekte sind hinsichtlich ihrer Langzeitsicherheit nicht vergleichbar. Vergleichende Gegenüberstellungen der Langzeitsicherheit unterschiedlicher Endlagerprojekte werden durch die IAEA nicht gefördert und im Rahmen der internationalen Forschungskooperation nicht realisiert. Ziel jedes Standortauswahlverfahrens ist der Nachweis eines geeigneten, langzeitsicheren Standortes. Es gibt keinen „idealen“, „besten“ oder „sichersten“ Wirtsgesteinstyp für die unterirdische Deponierung hochradioaktiver Abfälle. Jede Gesteinsart hat bestimmte Vor- und Nachteile hinsichtlich ihrer Eignung als Endlager-Wirtsgestein.

2.1 Wirtsgesteinsunabhängige Eigenschaften

Günstigstenfalls müsste der Einlagerungsbereich eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gleichzeitig über folgende Eigenschaften verfügen:

- geringe Wasserführung,
- sehr geringe Wasser- bzw. Gasdurchlässigkeit,
- hohe Wärmeleitfähigkeit,
- niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient,
- hohe Stabilität gegenüber geodynamischen Einwirkungen (z. B. Erdbeben, neotektonische Prozesse),
- hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide,
- ausreichend große Ausmaße geeigneter, nicht intensiv geklüfteter Gesteinsblöcke (zur Gewährleistung einer ausreichenden Flexibilität bei der Standortauswahl deutlich größer als das erforderliche Einlagerungsvolumen, incl. Sicherheitspfeiler),
- leichte bergmännische Erschließbarkeit sowie
- hohe Standsicherheit bergmännischer Auffahrungen über lange Zeiträume.

Da es keinen Gesteinstyp gibt, der alle genannten Kriterien erfüllt, ist die Entscheidung für ein bestimmtes Wirtsgestein ein schwieriger Abwägungsprozess, der vor allem durch die nationalen geologischen Voraussetzungen und durch raumordnerische Gesichtspunkte bestimmt wird. Eine Übersicht zu den international durchgeführten Endlagerstandort-Suchverfahren verdeutlicht, dass in den meisten Ländern bereits in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens, gestützt auf bereits vorliegende Kenntnisse zum geologischen

Tiefenbau der betrachteten Regionen, eine Vorfestlegung auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp erfolgte (siehe Kap. 4). Neben den unterschiedlichen geologischen Bedingungen sind dafür in vielen Ländern politisch motivierte Reglementierungen im Vorfeld der Standortauswahl verantwortlich.

Viele, im Rahmen von Gegenüberstellungen verschiedener Endlagerungsoptionen durchgeführte Vergleiche von Endlager-relevanten Eigenschaften unterschiedlicher Wirtsgesteinstypen sind stark vereinfacht dargestellt. Nachfolgend wird der Versuch unternommen, eine stärker an den realen Verhältnissen und Besonderheiten der jeweiligen Gesteinstypen orientierte Bewertung der Barriereigenschaften von Salz, Tongestein und Kristallingesteinen vorzunehmen.

2.2 Steinsalz

Schon Ende der 1950er Jahre gab es in den USA und in Deutschland Überlegungen bezüglich der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzgesteinen (siehe Kap. 4.5). Seit dieser Zeit wurden Optionen zur Endlagerung im Salz mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad auch in anderen Ländern mit dafür prinzipiell geeigneten Salzlagerstätten betrachtet, wie z. B. in den Niederlanden und Dänemark (RGD 1993, BAARTMANN & JACOBSEN 1980, JOSHI 1981, RICHTER-BERNBURG 1981), in Polen (JANACZEK & WŁODARSKI 2000, 2001), in Frankreich (siehe Kap. 4.3) sowie in der Ukraine, Belarus und Russland (WITHERSPOON & BODVARSSON 2001, 2006, KEDROVSKIJ 1992, LAPOTSHKIN 1997, 1998).

Aufgrund jahrzehntelanger Endlagerforschung im Salz und über 150-jährigen Erfahrungen im industriellen Salzbergbau sowie umfassenden Kenntnissen zur langzeitsicheren Lagerung chemisch-toxischer Abfälle im Steinsalz, liegt inzwischen ein umfangreiches Wissen zu den Endlager-relevanten Eigenschaften von Steinsalz bzw. Salzformationen vor. Es stehen erprobte geologisch-geophysikalische Erkundungsmethoden und im Verlaufe vieler Jahrzehnte weiterentwickelte Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Wirtsgesteinsparameter sowie zum Nachweis geeigneter Steinsalzbereiche zur Verfügung.

Endlagerkonzepte im Salz basieren auf einer Einlagerung der Abfälle in ausreichend großen Steinsalzbereichen. Die Bewertung der Langzeitsicherheit von HAW-Endlagern im Salz konzentriert sich demzufolge auf die Analyse der Eigenschaften von Steinsalz. Aufgrund ihrer spezifischen Bildungsbedingungen (Salzabscheidung in einem periodisch vom Ozean abgeschnürten Meeresbecken) enthalten Salzformationen neben Steinsalz auch tonige, karbonatische und vor allem anhydritische Einlagerungen sowie andere Salzminerale. Die räumliche Verteilung und die Eigenschaften dieser Komponenten sind bei der Bewertung der Barriereigenschaften der gesamten Salzformationen zu berücksichtigen. Deshalb müssen Erkenntnisse zum geologischen Bau (z. B. räumliche

Anordnung von Anhydrit- und Kalisalzschichten) und zu den Eigenschaften des nicht halitischen Anteils der Salinarstruktur in die Langzeitsicherheitsbetrachtungen einfließen.

In Abhängigkeit von der geologischen Entwicklung einer Salzlagerstätte bleiben die ursprünglich subhorizontalen Lagerungsverhältnisse der Schichten der Salzformation entweder erhalten („flach lagernde Salze“) oder die Ablagerungen werden infolge des Überlagerungsdruckes der Deckschichten, möglicherweise ergänzt durch regional wirkende Spannungsfelder, in Form von Salzkissen, Salzmauern oder Salzstöcken akkumuliert (Abb. 1).

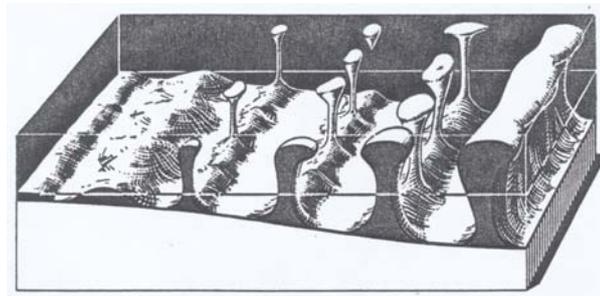


Abb. 1: Typen und Entwicklungsstadien von Salzlagerstätten (nach TRUSHEIM 1957, links – Salzkissen, mittig – Salzstöcke, rechts – Salzirücken, Salzmauern). Die in halber Höhe des Blockbildes verlaufende horizontale Linie markiert die primäre Mächtigkeit der vor den salztektonischen Prozessen ursprünglich flach lagernden Evaporite.

Am Beispiel der intensiv untersuchten Salzstruktur Gorleben lässt sich die viele Millionen Jahre andauernde geologische Entwicklungsgeschichte eines Salzstocks verdeutlichen (Abb. 2). Die Genese der Salzformation hat entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Salzablagerungen sowie auf die räumliche Verteilung der unterschiedlichen Gesteinsschichten in den Salzlagerstätten. Flach lagernde Salzformationen sind oft durch Wechsellagerungen von Steinsalzschiefern mit anhydritisch-karbonatischen, Kalisalz- oder auch tonigen Gesteinsschichten gekennzeichnet. Für Salzstöcke sind infolge des Salzaufstiegs im Kernbereich häufig mächtige homogene Steinsalzschiefer sowie in den Randbereichen i.d.R. jüngere, häufig weniger stark verfaltete Salzbildungen charakteristisch (Abb. 3).

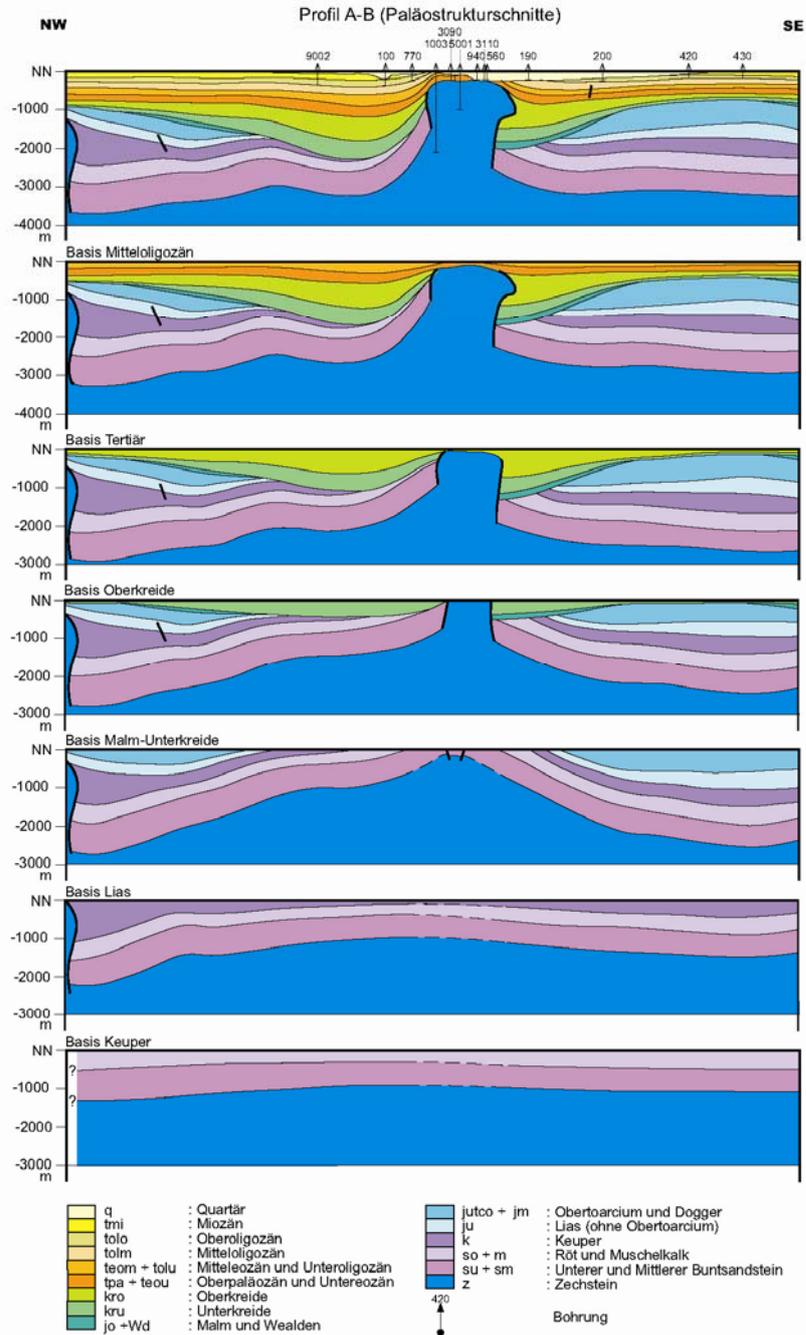


Abb. 2: Erdgeschichtliches Entwicklungsschema der Salzstruktur Gorleben (ZIRNGAST 1985).
 Basis Keuper – vor ca. 230 Mio. a; Basis Oberkreide – vor ca. 100 Mio. a; Basis Tertiär – vor ca. 65 Mio. a; Basis Mitteloligozän – vor ca. 30 Mio. a.

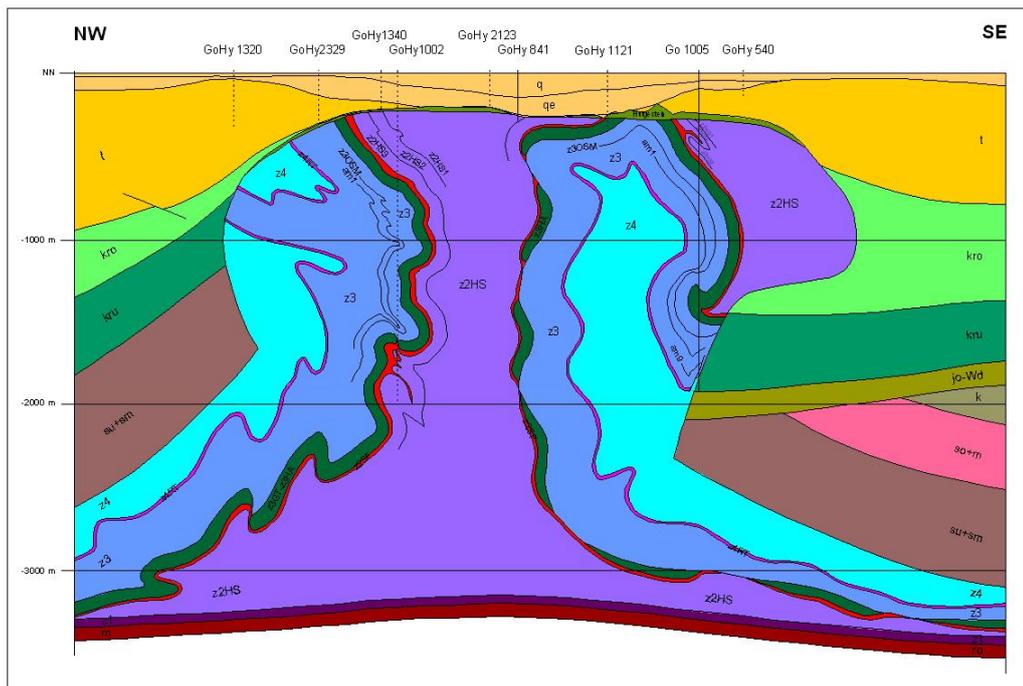


Abb. 3: Beispiel für die Lagerungsbedingungen der Salzsichten in Salzstöcken (Salzstock Gorleben, BORNEMANN et al. 2008)

Der Vorteil der Errichtung eines Endlagers in einem Salzstock im Vergleich zu flach lagernden Salzen besteht darin, dass aufgrund eines oft mehrere tausend Meter umfassenden Salzaufstiegsweges im Zentralbereich von Salzstöcken sehr häufig mächtige, weitgehend homogene und anhydrit- bzw. tonmineralarme Steinsalzbildungen mit nur geringen Gehalten wässriger Lösungen vorliegen. In flach lagernden Salzvorkommen, z. B. am Südrand des Zechsteinbeckens (Niederrheinische Bucht, Solling-Scholle und Scholle von Calvörde) sowie im Werra-Gebiet bzw. in der Thüringer Senke, weisen weitgehend reine Steinsalzsichten unter Berücksichtigung notwendiger Sicherheitsabstände zu anhydritischen und Kalisalzsichten nicht die für einen Endlagerbau erforderlichen Mächtigkeiten von ca. 500 m (siehe Kap. 3.3.1) auf.

Bei der Analyse der endlagerrelevanten Eigenschaften von Salzgesteinen sind aufgrund der Salzgenese nicht nur die Eigenschaften der für die Abfalleinlagerung vorgesehenen Steinsalzbereiche zu berücksichtigen, sondern auch der Einfluss anderer, toniger und anhydritischer Sedimentschichten. Wird die gesamte Salzformation betrachtet, so ist die Aussage „Salz ist weniger gut geeignet, weil es über ein schlechtes Radionuklid-Sorptionsvermögen verfügt“ nicht zutreffend. In den Staßfurt-, Leine- und Aller-Folgen des mitteleuropäischen Zechsteins kommen Tonschichten (z. B. Grauer Salzton, Roter Salzton) sowie Toneinlagerungen in Steinsalzsichten (z. B. Tonmittelsalz) vor, die bei Störfällen, wie z. B. Behälterausfall oder Versagen der geotechnischen Barrieren, in der Lage sind, Radionuklide effektiv zu sorbieren. In vielen Fällen befinden sich im Salzstock-internen Umfeld des im Steinsalz-Kern der Salzstruktur angeordneten Einlagerungsbereiches derartige Tonmineral-haltige Schichten, was sich günstig auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers auswirkt (BROOKINS 1984).

Erhöhte Ton- und/oder Anhydritgehalte vermindern die Standsicherheit sowie die gute Wärmeleitfähigkeit von reinem Steinsalz und steigern die Wahrscheinlichkeit von Lösungszutritten aus anhydrithaltigen Gesteinen in das Endlagerbergwerk. Im Ergebnis der untertägigen Standorterkundung müssen deshalb genaue, belastbare Daten zur räumlichen Verteilung ausreichend großer reiner Steinsalzpartien („Homogenbereiche“) als Einlagerungsbereich sowie von Anhydrit- und Tonmineral-haltigen Schichten im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches vorliegen. Damit können Einflüsse auf die Standsicherheit der bergmännischen Hohlräume oder Zuflüsse von größeren Lösungsvolumina aus mächtigen Anhydritblöcken ausgeschlossen und eine effektive Wärmeabfuhr aus dem Einlagerungsbereich gewährleistet werden. Innerhalb des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge, d. h. im vorgesehenen Einlagerungsbereich, kommt lediglich Polyhalit als Kalium-haltige Mineralphase vor, der unter Gebirgsdruck ähnlich hohe Temperaturbeständigkeiten (ca. 230 °C) aufweist, wie Steinsalz.

Aufgrund ihres Spröbruchverhaltens, einer erhöhten Wasserlöslichkeit und stärkeren Temperaturempfindlichkeit sind im Ergebnis der Erkundungsarbeiten detaillierte Kenntnisse zur Verteilung von Kaliflözen in der Salzstruktur und die darauf basierende Abgrenzung von Sicherheitspfeilern erforderlich (so z. B. zersetzt sich Carnallit unter Gebirgsdruck bei 130 bis 135 °C; KERN & FRANKE 1986, KERN, POPP & TAKESHITA 1992). Für die Erkundung dieser intrasalinaren Schichten stehen leistungsfähige und langjährig erprobte geophysikalische Untersuchungsmethoden zur Verfügung (siehe HAMMER et al. 2009).

Die im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinstypen doppelt bis dreimal so hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz hat neben kürzeren erforderlichen Abklingzeiten der Abfälle vor ihrer Einlagerung auch einen deutlich geringeren Platzbedarf für das Endlager im Vergleich zu Endlagerkonzepten in Tongesteinen oder im Kristallin zur Folge (JOBMANN et al. 2007). Neben der hohen Wärmeleitfähigkeit sprechen auch die relativ einfache Herstellung von Grubenräumen und die hohe Standfestigkeit von bergmännischen Auffahrungen für das Wirtsgestein Steinsalz. Die hohe Standfestigkeit der Hohlräume im Steinsalz ermöglicht im Unterschied zu Tongesteinen den Verzicht auf spezielle Ausbaumaßnahmen, was die Kosten des Endlagerbaus deutlich reduziert und keine zusätzlichen Probleme bei der Gewährleistung der Langzeitsicherheit des Endlagers (verursacht durch die Ausbaumaterialien) schafft. Spannungskonzentrationen an Hohlraumrändern werden vom Steinsalz infolge seiner rheologischen Eigenschaften (vorauselende bruchlose Kriechverformung) abgebaut, was die Gefahr von Ausbrüchen aus der Firste deutlich senkt. Günstig ist auch, dass radioaktive Bestrahlung keine Änderungen der physikalischen Eigenschaften von Steinsalz bewirkt (SCHULZE 1985).

Als besonders positiv für die Langzeitisolation von Abfällen im Steinsalz werden die sehr geringen Wassergehalte (insbesondere im aufgestiegenen Kernbereich von Salzstöcken) sowie die niedrigen Porositäten und Durchlässigkeiten von Steinsalzgesteinen gewertet. So weist z. B. das als Einlagerungsmedium im Salzstock Gorleben vorgesehene Hauptsalz der Stassfurt-Folge Wassergehalte von weniger als 0,02 Gew.-% auf (JOCKWER 1981). Geochemische Analysen der Lösungsvorkommen im Salzstock Gorleben und die Bromid-Verteilung in den Salzgesteinen belegen den primären Charakter der Lösungen, d. h. ein Alter von ca. 250 Mio. Jahren. Dies beweist, dass der für die Einlagerung der Abfälle vorgesehene Teufenbereich in diesem Zeitraum nicht durch Grundwässer beeinflusst wurde. Ausgehend von diesen Befunden ist Steinsalz in der Lage, Flüssigkeiten und Gase über sehr lange Zeiträume einzuschließen. Die Eigenschaft wird weltweit für die Endlagerung chemo-toxischer Abfälle in Untertagedeponien in Salzgesteinen und für die Speicherung von Erdöl bzw. Erdgas in Salzkavernen genutzt.

Die primären, ggf. beim Salzaufstieg umverteilten intrasalinaren Lösungen sind in Salzstöcken an bestimmte lithologisch-stratigraphische Schichten gebunden (BÄUERLE 2000, BFS 2002, SCHRAMM et al. 2009). Die Abgrenzung des für die HAW-Einlagerung vorgesehenen Steinsalzvolumens (inklusive entsprechender Sicherheitspfeiler) innerhalb eines Salzstockes muss die Bindung potenziell möglicher Lösungsreservoirs an bestimmte, meist Anhydrit-haltige Schichten und deren räumliche Lage im Bereich der Salzstruktur berücksichtigen (BORNEMANN et al. 2008). In der Regel spielen die im Kernbereich von Salzstöcken verbliebenen intrasalinaren Lösungsvorkommen aufgrund ihrer sehr geringen Volumina für die Langzeitsicherheit eines Endlagers keine Rolle.

Als ungünstig für die Endlagerung wird in vielen Wirtsgesteinsvergleichen die hohe Wasserlöslichkeit von Steinsalz angesehen. Studien zum Ablaugungsverhalten von Salzstöcken im Verlaufe der Erdgeschichte belegen allerdings in vielen Fällen eine sehr geringe Geschwindigkeit der Lösungsprozesse im Bereich des Salzspiegels. Die Grundwässer im tieferen Teil des Hutgesteins eines Salzstocks sind annähernd salzgesättigt (z. B. KLINGE et al. 2007) und können deshalb nur noch wenig Salz lösen. Bei Vorhandensein eines stabilen, langzeitbeständigen hydrodynamischen Regimes im unmittelbaren Umfeld der Salzformation, d. h. beim Fehlen eines intensiven Grundwasserzutritts bzw. bei nur geringen Volumina von aus dem System abgeführten salzgesättigten Lösungen, sind sehr geringe Ablaugungsraten zu erwarten. Für den Salzstock Gorleben wurden mittlere Ablaugungsraten von 0,01 mm/a bestimmt, seit der Elster-Kaltzeit, d. h. in den letzten ca. 300000 Jahren, von 0,2 mm/a (BORNEMANN et al. 2008). Die natürlichen Ablaugungsprozesse werden in den Endlagerkonzepten für Salz durch eine ausreichende Mächtigkeit der Salzbarrieren zum Deck- und Nebengebirge berücksichtigt.

Die von Kritikern der Endlagerung im Steinsalz immer wieder angeführten Beispiele für die große Gefahr des Absaufens von Salzbergwerken sind i.d.R. auf intensiven Salzbergbau (meist zur Kalisalzgewinnung) unmittelbar unterhalb des Salzspiegels, d. h. auf die Nichtbeachtung von Sicherheitsabständen zum grundwasserführenden Deck- und Nebengebirge zurückzuführen (Abb. 4). Bezugnehmend auf ein solches Sicherheitsrisiko wurde die Unverritztheit der Salzlagerstätte als sehr wichtiges Auswahlkriterium bei der Standortsuche für ein HAW-Endlager definiert und damit die Nutzung alter Salzbergwerke für die HAW-Endlagerung ausgeschlossen (siehe Kap. 3.2). Die im Salzstock Gorleben bereits realisierten bzw. noch vorgesehenen Erkundungs- und Einlagerungssohlen befinden sich mehrere Hundert Meter entfernt vom Salzspiegel und vom Nebengebirge (BORNEMANN et al. 2008).

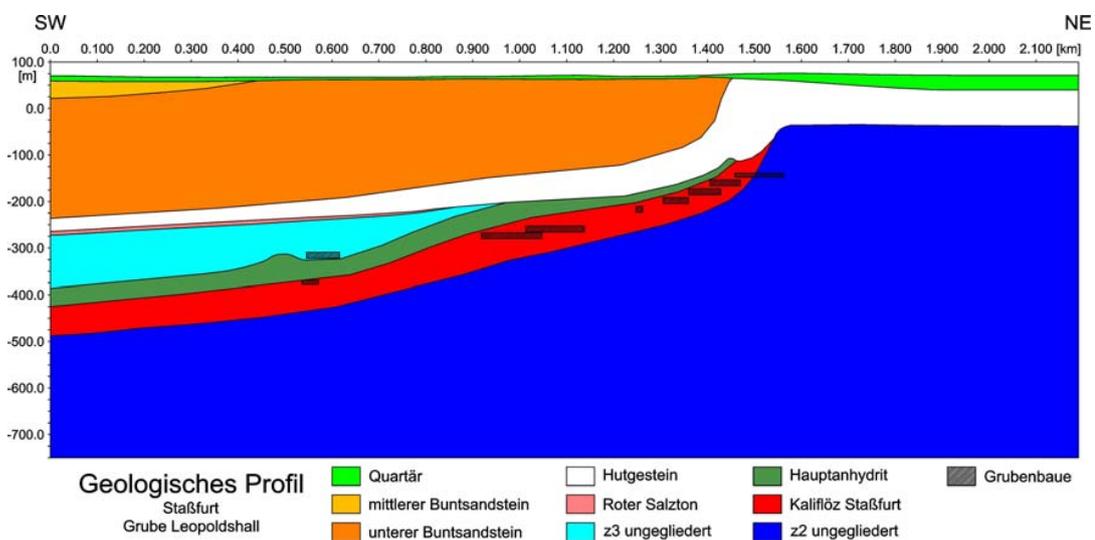


Abb. 4: Beispiel für das Absaufen eines Kalisalz-Bergwerkes durch Abbautätigkeit unmittelbar unterhalb des Salzspiegels (Standort Staßfurt)

Aussagen der Art, dass Salzgesteine keine offenen Klüfte enthalten und ein festes, für Flüssigkeiten und Gase nicht durchlässiges Kristallgefüge haben sowie als quasiviskose Flüssigkeit aufgestiegen und als solche bruchlos verformt wurden, sind stark vereinfachend und z. T. auch falsch. Real existierende Salzformationen sind komplex zusammengesetzt und enthalten neben Steinsalz noch andere, in ihren Eigenschaften deutlich vom Steinsalz abweichende Bestandteile (z. B. anhydritische Schichten oder Kalisalzflöze). Für diese Gesteine sind o.a. Aussagen nicht zutreffend. In vielen Salzstöcken werden Klüftbildungen und Deformationsstrukturen beschrieben, die auf die unterschiedlichen geomechanischen Eigenschaften dieser am Salzstockaufbau beteiligten Schichten zurückzuführen sind (siehe z. B. FISCHBECK & BORNEMANN 1993). So werden z. B. relativ häufig im Grauen Salzton, im Hauptanhydrit der Leine-Folge oder an der z2/z3-Grenze Klüfte beobachtet, die mit dem Salzaufstieg und den dabei oder später wirkenden tektonischen Prozessen im regionalen Umfeld der Salzstrukturen erklärt werden können (BORNEMANN et al. 2000). Diese Klüfte sind allerdings i.d.R. mit Steinsalz verheilt und können nicht als Wasserwegsamkeiten dienen. Verheilte und/oder mit Lösungen gefüllte Klüftsysteme

bilden allerdings keine durchgehenden Wegsamkeiten, da der Hauptanhydritstrang durch den Salzaufstieg zerbrochen ist und dadurch die einzelnen Hauptanhydritschollen keinen Kontakt mehr zueinander aufweisen.

Auch im halitischen Zentralbereich großer Salzstöcke finden sich zahlreiche Hinweise auf Bruchdeformationen, die jedoch aufgrund des plastischen Verhaltens, d. h. des Kriechvermögens des Steinsalzes verheilt sind. Abb. 5 zeigt am Beispiel einer Probe aus dem Hauptsalz des Salzstockes Gorleben, dass sich Steinsalzproben im Kernbereich von Salzstöcken häufig aus halitischen Kristallbruchstücken zusammensetzen, die in einer feinkristallinen Steinsalzmatrix angeordnet sind. Alle zur Verfügung stehenden Untersuchungsergebnisse aus dem Salzbergbau und aus Endlager- bzw. Kavernenprojekten im Salz belegen, dass aufgrund des zähplastischen Kriechverhaltens des Steinsalzes innerhalb von reinen Steinsalzpartien keine offenen Klüfte existieren, d. h. es sind keine freien Lösungsbewegungen möglich. Im Steinsalz durchgeführte Permeabilitätsbestimmungen ergeben meist sehr geringe Werte von $< 10^{-21} \text{ m}^2$. Lediglich im Bereich der bis ca. 1 m mächtigen Auflockerungszonen um bergmännische Hohlräume herum werden deutlich höhere Permeabilitäten bis 10^{-15} m^2 bestimmt (NOWAK & WEBER 2002).

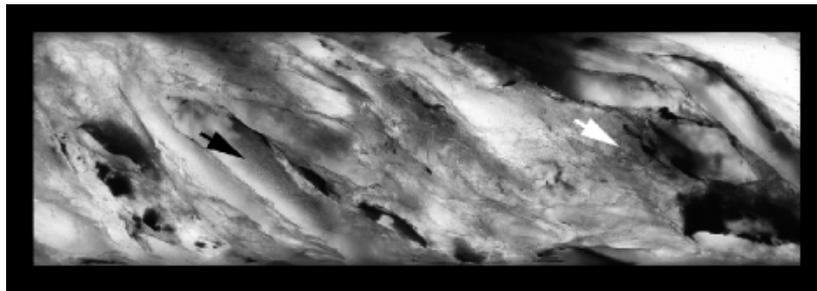


Abb. 5: Polierter Anschliff einer Hauptsalzprobe (Kristallbrockensalz) aus dem Salzstock Gorleben mit deutlichen Anzeichen für bruchhafte Deformationen und anschließende Verheilungsprozesse (schwarzer Pfeil – Kristallbruchstück, weißer Pfeil – Matrix, Höhe ca. 5 cm)

Die besondere Eignung von Steinsalz als Endlagerwirtsgestein wird auch dadurch unterstrichen, dass die bei Anlegen eines äußeren Spannungsfeldes oder bei steigenden Temperaturen (bei Wärmeeintrag durch ausgediente Brennelemente oder HAW-Kokillen) entstehenden Spannungen durch die viskoplastischen Eigenschaften des Steinsalzes abgebaut werden. Diese Besonderheit von Steinsalz erleichtert gleichzeitig auch den Langzeitsicherheitsnachweis für Endlagerprojekte im Salz, da im Unterschied zu Kristallin- oder stärker metamorphisierten Tongesteinen, auch deutliche Veränderungen in den regionalen Spannungsverteilungen nicht dazu führen können, dass im Salz neue, langfristig geöffnete Klüfte entstehen. Insbesondere in kristallinen Gesteinen können infolge von regionalgeologischen, geotektonischen Prozessen Umorientierungen und Größenänderungen der Spannungsvektoren dazu führen, dass neue Klüfte entstehen oder die Durchlässigkeit bereits bestehender Kluftsysteme über einen längeren Zeitraum signifikant ansteigt (siehe Kap. 2.4).

Aufgrund des zunehmenden Kriechvermögens von Steinsalz bei erhöhten Temperaturen werden die eingelagerten Abfälle nach einigen hundert bis tausend Jahren fest im Steinsalz eingeschlossen. Im deutschen Referenz-Endlagerkonzept ist eine Rückholung der Abfälle nicht vorgesehen (FILBERT & ENGELMANN 1998). Technisch ist eine Rückgewinnung der Endlagerbehälter natürlich auch aus Steinsalz möglich, was durch den dichten Einschluss der Endlagerbehälter (bedingt durch das Kriechen des Steinsalzes) leichter möglich, ist als aus anderen Wirtsgesteinen.

Als günstig für die Nutzung von Steinsalzvorkommen in Salzstöcken als Endlagerwirtsgestein können auch die gute Prognostizierbarkeit der Eigenschaften und der weiteren geologischen Entwicklung von Salzstrukturen sowie die gute Explorierbarkeit des Aufbaus und der Wirtsgesteinseigenschaften mit langfristig erprobten Untersuchungsmethoden angesehen werden. Es gibt bedingt durch die intensive geologische Erkundung und wirtschaftliche Nutzung von Salzvorkommen sehr klare Vorstellungen zur historischen und zukünftigen Entwicklung der deutschen Salzvorkommen über sehr lange Zeiträume und zum Einfluss äußerer Faktoren auf diese Prozesse (siehe z. B. JARITZ 1973). Im Ergebnis umfangreicher Laborstudien und In-situ-Experimente liegen inzwischen ausreichende Kenntnisse zur Veränderung der gesteinsmechanischen Eigenschaften von Steinsalz bei der HAW-Einlagerung vor, die als wichtige Grundlage des für die Genehmigung eines Endlagers erforderlichen Langzeitsicherheitsnachweises dienen (z. B. BRÄUER et al. in Vorb.).

2.3 Tongesteine

Tongesteinsformationen haben als abdeckende, praktisch undurchlässige Schichten z. B. für Kohlenwasserstoff- oder Grundwasservorkommen und als natürlicher Untergrund von oberflächigen Abfalldeponien ihre langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere bewiesen. Allerdings fehlen weltweit Bergbau-Erfahrungen in diesem Gesteinstyp.

Die Isolationseigenschaften von Tongesteinen hängen von zahlreichen Faktoren ab, die es bei der Standortauswahl bzw. -erkundung und bei der Erarbeitung des Endlagerkonzeptes zu berücksichtigen gilt. Günstig für die Langzeitisolation von radioaktiven Abfällen bewertete Eigenschaften von Tongesteinen sind:

- geringe hydraulische Durchlässigkeit und geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten (ca. 10^{-19} bis 10^{-22} m² bzw. 10^{-13} m/s),
- niedrige Porosität und geringe Porengrößen (meist zwischen 1 und 25 nm),
- Homogenität,
- plastisches Verhalten und Selbstheilung von Klüften durch plastisches Fließen und Quellen,

- gute Puffer- und Sorptionseigenschaften (hohe Neutralisationskapazität),
- reduzierende Bedingungen,
- stabiles hydrodynamisches Regime sowie
- Fehlen eines advektiven Radionuklidtransports und Dominanz von diffusiven Prozessen (Diffusionsgeschwindigkeit $< \text{ca. } 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

Diese Eigenschaften hängen in starkem Maße von der Intensität und vom zeitlichen Ablauf der Diagenese bzw. Metamorphose (Einfluss der Versenkungsgeschichte), von der tektonischen Beanspruchung und der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der Tongesteine sowie von den geologischen Rahmenbedingungen bei der Bildung der Tonformationen (z. B. Liefergebiete, Sedimentationsbedingungen) ab. RICHTER-BERNBURG wies bereits 1972 im Rahmen eines Vergleichs unterschiedlicher Speichergesteine auf Probleme von Tonen als Speichermedium hin. Als problematisch wurden insbesondere mögliche Beeinträchtigungen der Dichtigkeit bei stärker metamorph überprägten Tonsteinen und im Umfeld bergmännischer Auffahrungen (EDZ) sowie geringe Standfestigkeiten und die sich daraus ergebenden Notwendigkeiten zusätzlicher technischer Maßnahmen zum Ausbau und zur Spezialabdichtung von bergmännischen Auffahrungen in Tongesteinen gesehen.

Tongesteinsvorkommen können aufgrund ihrer lithologischen Zusammensetzung und metamorphen Überprägung in einigen Fällen nur eine eingeschränkte Eignung als Wirtsgesteine für die HAW-Endlagerung aufweisen. Relativ häufig sind Tonformationen infolge von Änderungen in den Ablagerungsbedingungen heterogen zusammengesetzt, weisen infolge differenzieller Absenkungen der Sedimentationsräume z. T. beträchtliche fazielle Unterschiede sowie Mächtigkeitsschwankungen auf und führen sandige Partien bzw. Linsen, die sich negativ auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen auswirken können (Abb. 6). So z. B. wurden für den Opalinuston im Zürcher Weinland Mächtigkeitsschwankungen zwischen 90 und 140 m bestimmt, die mehrheitlich durch syndimentäre Bewegungen verursacht wurden (NAGRA 2005).

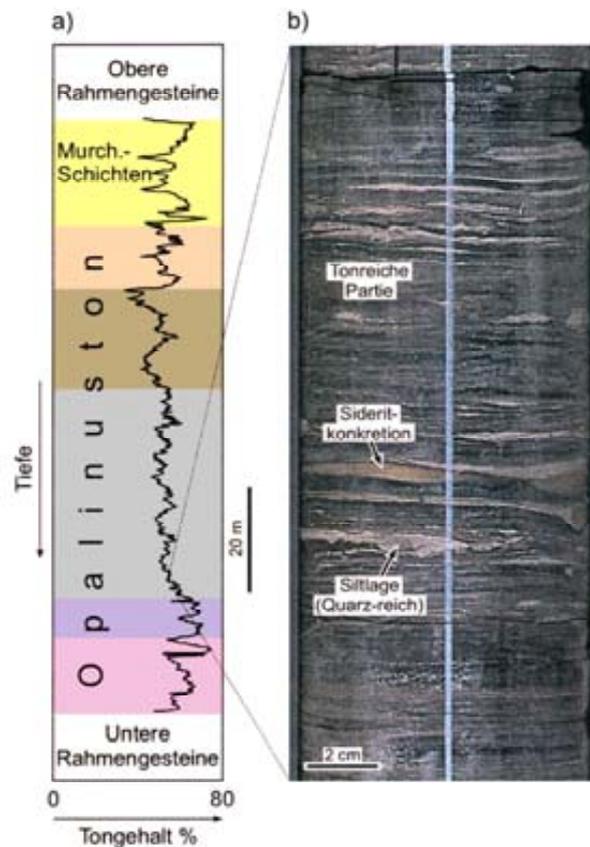


Abb. 6: Lithologische Inhomogenitäten bzw. Schwankungen im Tongehalt eines heterogen zusammengesetzten Teilabschnittes des Opalinustones der Schweiz, der generell als Beispiel für ein relativ homogenes toniges Wirtsgestein gilt (NAGRA 2002a)

Relativ oberflächennah (bis in Tiefen von ca. 200 – 300 m) lagernde Tonschichten können intensiven Erosionsprozessen, z. B. in Form von Rinnenbildungen während einer Inlandvereisung oder als Folge tiefer Erosionstätigkeit von Flüssen, ausgesetzt sein. Dies kann zu deutlichen Beeinträchtigungen der Barriereigenschaften der Gesteine führen. Aufgrund ihrer z. T. heterogenen Zusammensetzung (Abb. 7) und der sich daraus ergebenden großen Variabilität der Eigenschaften sowie infolge lokaler Schwankungen im Diagenese- bzw. Metamorphosegrad sind für die Standorterkundung und für die Ausweisung von geeigneten Einlagerungsfeldern innerhalb der Tonsteinvorkommen erhöhte Aufwendungen erforderlich (siehe HAMMER et al. 2009).

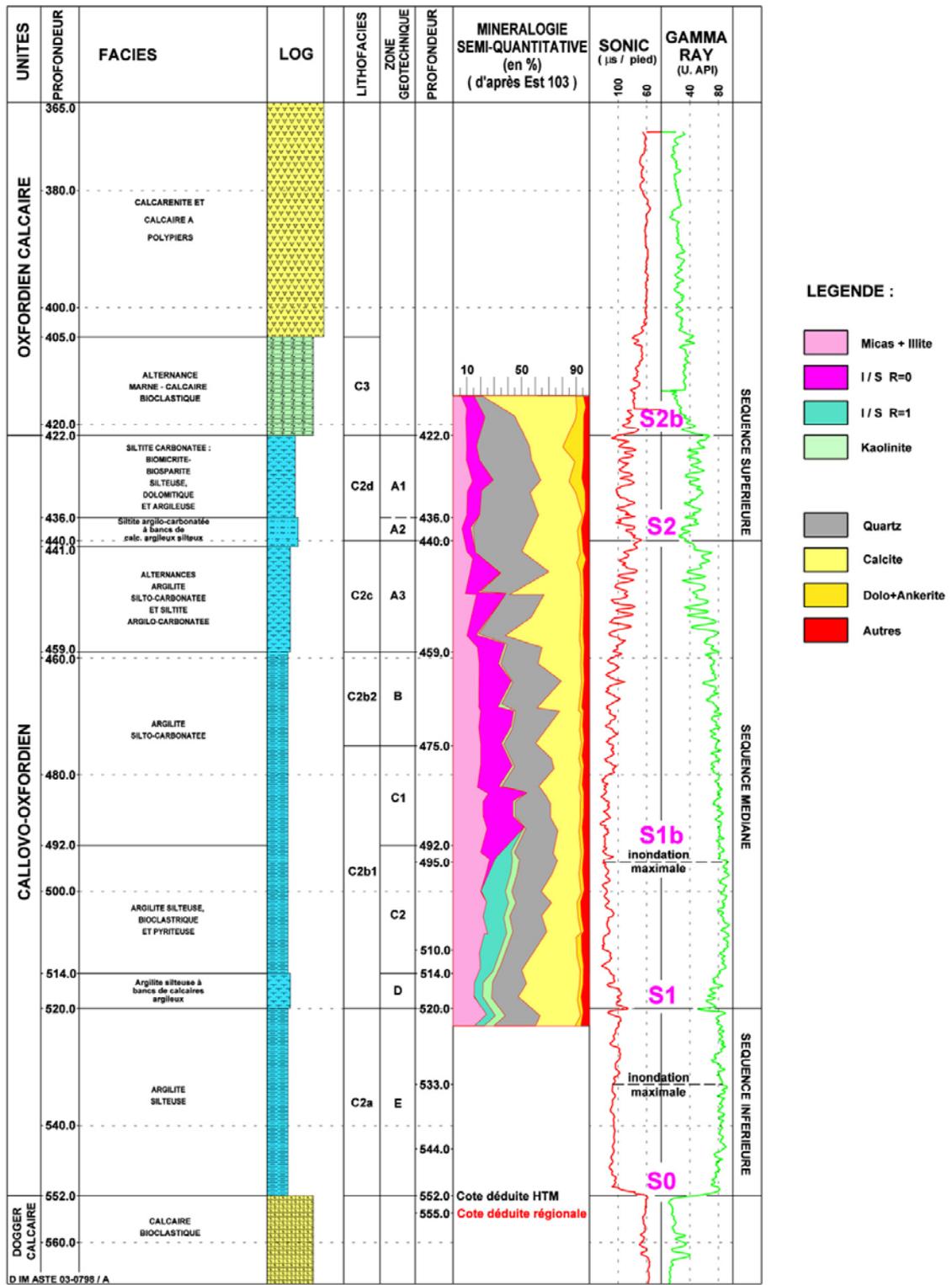


Abb. 7: Illustration der Schwankungsbreiten in der mineralogischen Zusammensetzung der jurassischen, in Frankreich für die HAW-Endlagerung vorgesehenen Tongesteine (ANDRA 2005c)

Mit zunehmender Versenkungstiefe bzw. ansteigendem Diagenese-/Metamorphosegrad verlieren Tongesteine ihre Plastizität und sind häufig stärker geklüftet, d. h. es verändern sich die mineralogische Zusammensetzung und die petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine. Quellfähige Tonminerale, wie Smektite oder Montmorillonite werden zu nicht quellfähigen Mineralen (z. B. Illit) umgewandelt. Im Ergebnis der Bildung von Klüften, z. B. in der Nähe von Störungszonen, als Entlastungsklüfte infolge starker tektonischer Hebung, durch tief reichende Alterationsprozesse oder starke thermische Überprägung, beschränken sich die Stofftransporte in Tonen nicht nur auf Diffusionsprozesse, sondern auch auf advective Vorgänge. In derartigen Fällen nehmen die Durchlässigkeiten der Tonsteinformationen deutlich zu, was dazu führt, dass sie schlechter in der Lage sind, einen Grundwasserzutritt zu den Abfällen zu verhindern und den langzeitsicheren Einschluss der Abfälle zu gewährleisten (Abb. 8). Einen ersten Hinweis zur wahrscheinlich zu erwartenden Gebirgsdurchlässigkeit von tonigen Gesteinen gibt ihr Gehalt der Tonfraktion (HOTH et al. 2007). Ist der z. B. mittels Schlämmanalyse oder Bohrlochgeophysik bestimmte Tonanteil größer 80 %, so liegen die Gebirgsdurchlässigkeiten i.d.R. unterhalb 10^{-10} bis 10^{-12} m/s. Bei ihren Untersuchungen des Opalinustons wies die NAGRA nach (NAGRA 2002a), dass im endlagerrelevanten Teufenbereich des Untersuchungsgebietes keine hydraulisch wirksamen Störungen oder Klüfte vorkommen („inhärentes Selbstabdichtungsvermögen“).

Erhöhte Klüftbildungsraten bzw. Permeabilitäten sind in einigen Fällen an lokale Temperaturanomalien und daran gebundene temperaturinduzierte Gesteinsmetamorphosen geknüpft. Diese endlagerrelevanten Prozesse im Umfeld von Wärmequellen sind für tonige Wirtsgesteine durch spezielle In-situ-Studien detailliert zu untersuchen (siehe HAMMER et al. 2009).

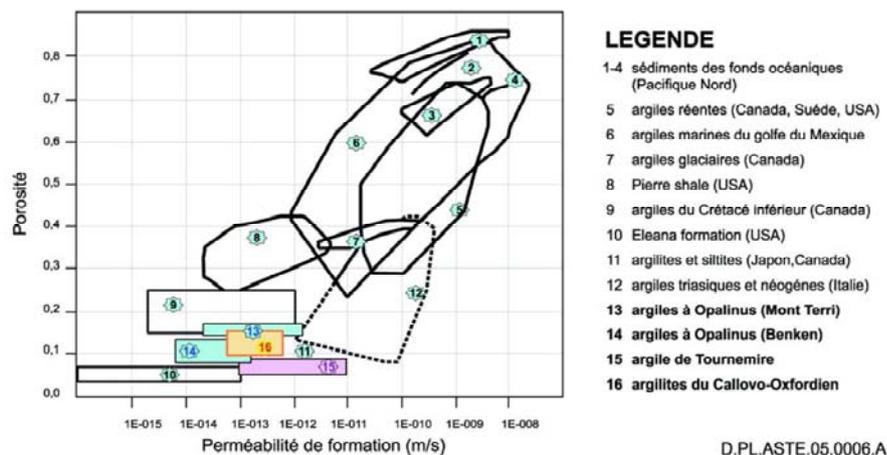


Abb. 8: Hydraulische Durchlässigkeit der in Frankreich für die HAW-Endlagerung vorgesehenen Tonformation im Vergleich mit anderen Tonvorkommen (ANDRA 2005c)

Aufgrund von Variationen in ihrer diagenetischen bzw. metamorphen Überprägung, insbesondere im darauf basierenden Wassergehalt und im Tonmineralbestand, können Tongesteine erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten und damit in der Stabilität unterirdischer Hohlräume aufweisen (Abb. 9). Die im belgischen Endlagerkonzept ausgewählten und im URL Mol aufgeschlossenen Tertiärtone sind infolge ihrer geringen Versenkungstiefe durch niedrige Druckfestigkeiten und eine hohe Plastizität charakterisiert (siehe z. B. MAZUREK et al. 2003). Dies hat eine Selbstheilung von Rissen, Störungszonen und Auflockerungszonen, d. h. eine deutliche Reduzierung möglicher advektiver Radionuklidtransporte zur Folge. Gleichzeitig verursacht dies aber auch eine geringe Standfestigkeit der bergmännischen Auffahrungen sowie zahlreiche ingenieurgeologische Probleme und hohe Aufwendungen für den Bergwerksbau. In Deutschland werden infolge dieser Einschränkungen tertiäre Tonvorkommen nicht als potenzielle Endlagerwirtsgesteine angesehen (HOTH et al. 2007).

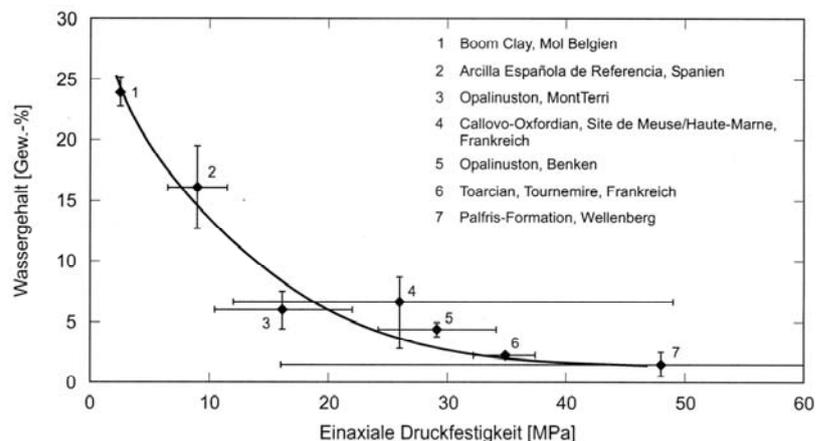


Abb. 9: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von tonigen Gesteinen von ihrem Wassergehalt (NAGRA 2002a). Deutlich zu sehen sind die extrem großen Schwankungsbreiten der einaxialen Druckfestigkeiten für die Tonvorkommen nahe Bure (4) und Wellenberg (7).

Stärker diagenetisch verfestigte bzw. metamorphisierte (konsolidierte) Tonformationen ähneln in ihrem Verhalten eher kristallinen Gesteinen mit relativ geringen Porositäten und Wassergehalten, geringer Plastizität sowie höheren Druckfestigkeiten (Abb. 10). Sie tendieren zu spröden, bruchhaften Verformungen, was erhöhte Klüftigkeiten und Permeabilitäten der Gesteine, also deutliche Beeinträchtigungen ihres Isolationsvermögens zur Folge hat. Auch kann in stärker metamorphisierten Tongesteinen mit ihrer charakteristischen Schieferung die Standsicherheit von Strecken meist nur mit speziellen Ausbaumaßnahmen erreicht werden, was die Herstellungs- und Instandhaltungskosten für das Endlagerbergwerk deutlich erhöht und den Langzeitsicherheitsnachweis komplizierter gestaltet.

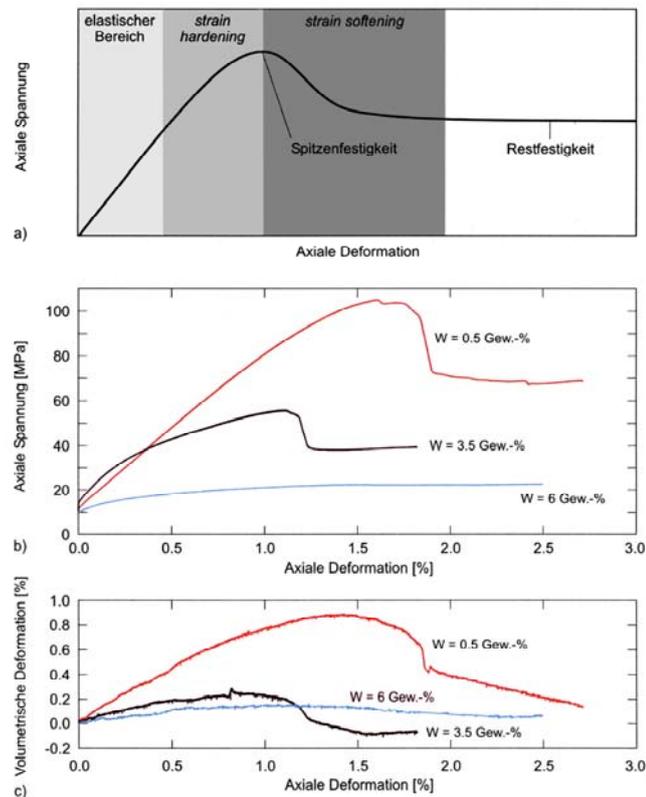


Abb. 10: Änderung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften von Tonformationen bei abnehmenden Wassergehalten, d. h. bei stärkerer metamorpher Überprägung (NAGRA 2002a)

Tongesteine können infolge einer heterogenen Zusammensetzung und lokal unterschiedlicher metamorpher Überprägung deutliche Anisotropien in ihren geomechanischen sowie hydraulischen Eigenschaften aufweisen, was insbesondere für die Planung des Endlagerbergwerks und beim Langzeitsicherheitsnachweis zu beachten ist. Diesbezüglich ist ebenso zu berücksichtigen, dass ähnlich wie für kristalline Gesteine auch in Tonformationen Veränderungen in der Orientierung und Größe der Spannungsvektoren in unterschiedlichen Tiefenniveaus möglich sind (Abb. 11), was großen Einfluss auf das Endlagerkonzept bzw. den Endlagerbau haben kann.

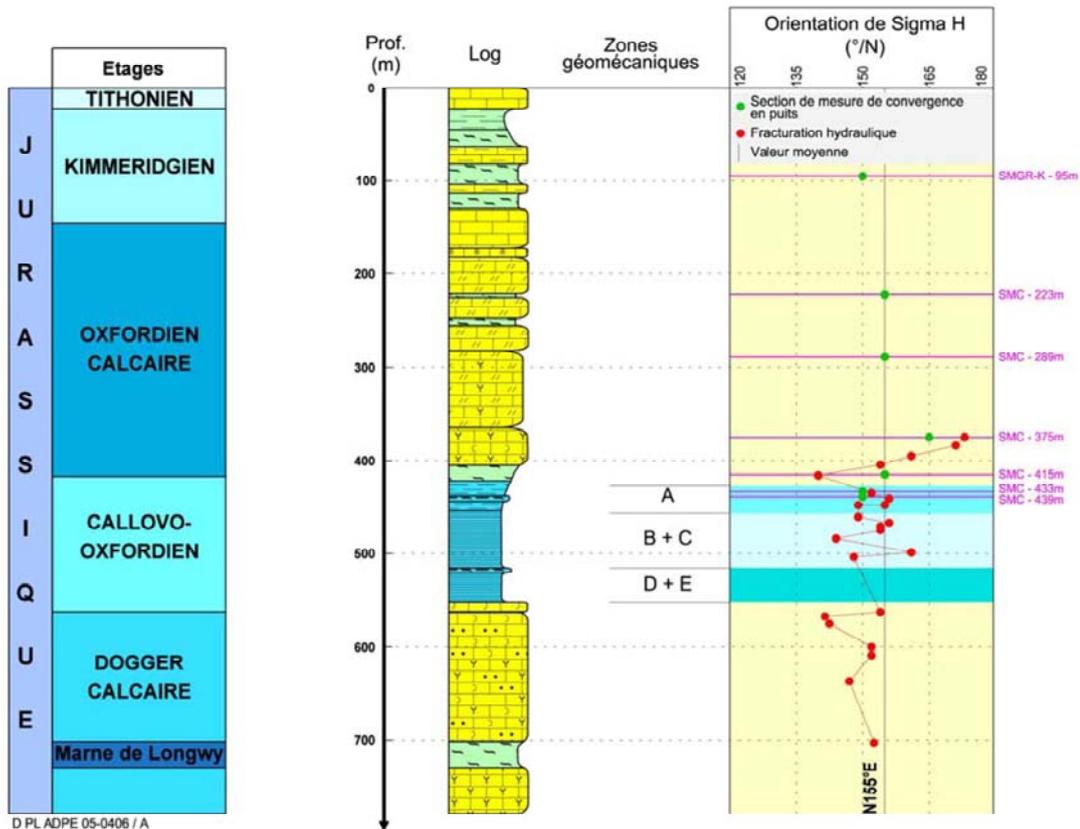


Abb. 11: Änderung der Orientierung des Normalspannungsvektors mit zunehmender Tiefe des in Frankreich als Endlagerwirtsgestein vorgesehenen Callovo-Oxfordian-Tons (ANDRA 2005c)

Auch die mineralogisch-geochemische Zusammensetzung von Tonen, wie z. B. die Gehalte und die Spezies der einzelnen Tonminerale oder der Karbonatgehalt schwanken häufig sehr stark (Abb. 12), was Änderungen im Sorptionsvermögen und in den geomechanischen Eigenschaften sowie in der thermischen Stabilität der Tongesteine zur Folge hat.

Insgesamt erfordern die spezifischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften von Tonstein einen deutlich erhöhten Untersuchungsaufwand bei der Standortcharakterisierung gegenüber Standorten im Steinsalz oder Kristallin.

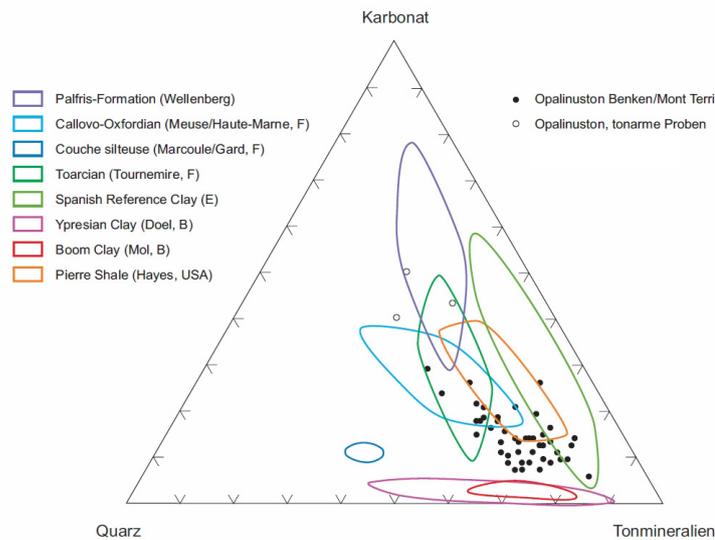


Abb. 12: Variationsbreiten in der mineralogischen Zusammensetzung von weltweit vorkommenden tonigen Gesteinen (NAGRA 2002a)

Ungünstig für die Langzeitisolation radioaktiver Abfälle in Tongesteinen sind neben der oftmals geringen Standfestigkeit bergmännischer Auffahrungen und der daran gebundenen Notwendigkeit von Ausbaumaßnahmen vor allem die niedrige Wärmeleitfähigkeit und die vom Diagenese- bzw. Metamorphosegrad abhängige, aber i. d. R. hohe Temperaturempfindlichkeit von tonigen Sedimenten. Die vergleichsweise geringe mögliche Temperaturbelastung von tonigen Gesteinen hat größere Abstände zwischen den Endlagerbehältern und damit einen größeren Platzbedarf (JOBMANN et al. 2007) sowie möglicherweise die Beeinträchtigung der Barrierenintegrität durch wärmeinduzierte Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung und der Eigenschaften der Gesteine zur Folge. Bereits bei Temperaturen von unter 90 °C kommt es zu Veränderungen von Tonmineralen, möglicherweise einhergehend mit einer Senkung des Sorptionsvermögens und einem zumindest partiellen Verlust der plastischen Gesteinseigenschaften. Durch die Wärmeabgabe der Endlagerbehälter kann es zu Schrumpfungen der tonigen Sedimente kommen, was zur Entstehung von Klüften und damit zur Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit führt. Zur Verhinderung bzw. Reduzierung dieser Effekte müssen die Endlagerbehälter länger zwischengelagert und bezüglich ihrer Wärmeabgabe optimiert werden.

Ungünstig für die Nutzung von Ton/Tongesteinen als Endlagerwirtsgesteine ist neben den oft erhöhten Wassergehalten außerdem die im Vergleich zum Steinsalz schlechtere interne Erkundbarkeit der Tonschichten und das ungenügende Auflösungsvermögen vieler geophysikalischer Untersuchungsmethoden in diesem Gesteinstyp. Im Unterschied zum Steinsalz, das mit einem einfachen, gut untersuchten Feststoffmodell beschrieben werden kann, ist für die Analyse der Barriereigenschaften von Ton/Tonstein ein komplexes, bisher nicht ausreichend definiertes Mehrkomponentenmodell erforderlich, das thermische,

hydraulische, mechanische und chemische (THMC) Prozesse berücksichtigt. Bei vergleichsweise hohen Wassergehalten in den Tongesteinen kann es bei Erhitzung zur Freisetzung großer Mengen fluider Phasen kommen. Problematisch für die Barrierenintegrität in tonigen Gesteinen können auch die, bei der temperaturinduzierten Umwandlung der in vielen Sedimenten enthaltenen organischen Substanzen entstehenden Gase sein.

Analysen der Gehalte organischer Substanzen und ihres Inkohlungsgrades sind deshalb wichtige Bestandteile der Standorterkundungsprogramme für tonige Wirtsgesteine (siehe z. B. HOTH et al. 2007). Speziell zu dieser Problematik von der NAGRA durchgeführte Versuche (NAGRA 2002a) ergaben für den Opalinuston der Schweiz sehr geringe Gasbildungsrate, die nicht zur Bildung von Rissen im Tongestein führten. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeiten erfolgt die Gasmigration im Opalinuston nicht durch dilatanz-gesteuerte, sondern durch diffusive Prozesse.

Weitere Auswirkungen auf ein Endlager sind durch die Wechselwirkung von in das Endlagerbauwerk eingebrachten Materialien mit dem Tonstein anzunehmen. Dies erfordert umfangreiche In-situ-Untersuchungen und hohe Aufwendungen für die Optimierung der technischen bzw. geotechnischen Barrieren.

2.4 Kristallingesteine

Insbesondere in Ländern auf alten kontinentalen Schilden mit ausgeprägter Hebungstendenz, d. h. mit fehlendem oder nur geringmächtigem sedimentärem Deckgebirge, werden, häufig in Ermangelung anderer Wirtsgesteinsoptionen, Endlagerprojekte im Kristallin verfolgt und bereits realisiert (z. B. in Finnland, Schweden und Canada; siehe Kap. 4.1, siehe auch WITHERSPOON & BODVARSSON 2001, 2006). Trotz der in vielen Fällen im Vergleich zu Salz- oder Tonformationen deutlich eingeschränkten Barrierewirkung kristalliner Gesteine wurden in mehreren Ländern auf der Basis der Ergebnisse von Standorterkundungen und von In-situ-Untersuchungen in den URL Langzeitsicherheitsnachweise für Endlagerkonzepte mit Multibarrierensystemen für magmatische oder vulkanische Wirtsgesteine durchgeführt (z. B. NAGRA 1985, NAGRA 1994b, NAGRA 1994e, NEALL ET AL. 1995, SKB 1999, VIENO & NORDMAN 1999, McEWEN & ÄIKÄS 2000, SKI 2001, NEALL & SMITH 2004, HSK 2004, NUMO 2004).

(Bemerkung: In der der Endlagerproblematik gewidmeten Literatur wird der Begriff „kristalline Gesteine“ als Synonym für magmatische oder hochmetamorphe Gesteine aluminosilikatischer Zusammensetzung verwendet (z. B. Granite, Gneise, Tuff, Basalt). Solche, vorwiegend aus Kristallen zusammengesetzten Gesteine wie Salz- oder Anhydritgesteine werden nicht darunter verstanden.)

Im Unterschied zu den Endlagerkonzepten in Tongesteinen und Steinsalz kann bei der Endlagerung im Kristallin nicht von einem vollständigen Einschluss der Abfälle durch das Wirtsgestein ausgegangen werden. Mögliche Einschränkungen des Isolationspotenzials der geologischen Barriere werden maßgeblich durch die vorhandenen Kluftsysteme und ihre wahrscheinliche weitere Entwicklung bestimmt. Die detaillierte Charakterisierung des Klüftungs- bzw. Störungsgrades der Gesteine stellt folglich einen wesentlichen Teil der Standorterkundung dar (HAMMER et al. 2009). Die Charakterisierung der Kluftsysteme, insbesondere ihre Vernetzung, ist häufig sehr komplex und mit den existierenden Methoden oft nicht vollständig erfassbar. Im Zusammenhang mit der eingeschränkten Kenntnis über die aktuell und zukünftig vorliegenden Kluftsysteme und die damit verbundenen Unsicherheiten stellt sich die Frage, inwieweit sich der Langzeitsicherheitsnachweis auf die Rückhaltefunktionen der geologischen Barriere stützen kann. Zusätzliche technische und geotechnische Barrieren sind daher ein wesentlicher Bestandteil der Endlagerkonzepte im Kristallin und eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Führung des Langzeitsicherheitsnachweises.

Die z. Zt. vorhandenen Daten zu den Eigenschaften von Kristallingesteinen stammen aus Lagerstättenexplorationsprogrammen, Baumaßnahmen, wissenschaftlichen Untersuchungen im Grundgebirge, aus dem Erzbergbau und aus Endlagerprojekten im Kristallin (siehe Kap. 4). Die Möglichkeit der Nutzung von kristallinen Gesteinen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ergibt sich vor allem aus folgenden Eigenschaften (z. B. MILNES et al. 1980, PAPP 1997, HERRMANN & RÖTHEMEYER 1998, PETROV 2001, LAVEROV et al. 2001):

- die hohe Druckfestigkeit der Gesteine, was bei Beachtung der Spannungsverteilungen im Gebirge und ausreichendem Abstand zu mächtigen Störungszonen eine hohe Standfestigkeit der bergmännischen Auffahrungen auch in großen Tiefen garantiert,
- das oft sehr große Volumen von Magmatitkomplexen (d. h. ausreichender Platz bzw. viele Standortalternativen innerhalb von Intrusivkörpern),
- die meist annähernd homogene Zusammensetzung der Gesteine, insbesondere im Zentralteil von Intrusivkörpern. Lithologische Inhomogenitäten, wie z. B. Einschlüsse oder magmatische Gänge, konzentrieren sich häufig im Randbereich der Magmatitkomplexe, stellen aber in vielen Fällen Grundwasserwegsamkeiten dar,
- eine große Stabilität gegenüber Wärme- und Strahlungseinwirkungen. Kristalline Gesteine haben meist eine hohe, weitgehend temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit und geringe Wärmeausdehnungskoeffizienten, was geringe thermisch induzierte Spannungen in den Gesteinen zur Folge hat,

- der niedrige Wassergehalt der Gesteine im ungestörten Zustand (gewöhnlich weniger als 0,5 %), die geringe Wasserlöslichkeit und die chemische Inertheit der Gesteine. Die in Granitoiden vorkommenden, i.d.R. schwach alkalischen Grundwässer sind in vielen Fällen nur gering mineralisiert (eine Ausnahme bilden die Grundwässer im URL Äspö) und ab Teufen von ca. 200 bis 250 m überwiegend reduzierend. Dies wirkt sich negativ auf das Lösungsverhalten und Migrationsvermögen von Radionukliden in diesen Grundwässern aus,
- die nur sehr geringen Diffusionsgeschwindigkeiten innerhalb der Gesteinsmatrix sowie
- die Bildung von sekundären Tonmineralen mit erhöhten Sorptionskapazitäten im Ergebnis der Verwitterung bzw. metasomatischen Überprägung kristalliner Gesteine. Diese Alterationsprozesse werden ggf. unterstützt durch die Zirkulation von erhitzten Wässern im Endlagernahfeld. Die Mineralum- bzw. -neubildungen können zu einem zumindest partiellen Verschluss von Klüften führen (siehe LAVEROV et al. 1994).

Die meist hohen Festigkeitswerte von Kristallingesteinen zeichnen verantwortlich für eine hohe Standsicherheit der bergmännischen Hohlräume, führen aber im Vergleich zum Salz zu aufwändigeren bergmännischen Vortriebsarbeiten und zur Bildung von z. T. mehrere Meter mächtigen Auflockerungszonen (EDZ) mit signifikant höheren Durchlässigkeiten im Umfeld der Auffahrungen. Aus bergbautechnischer Sicht ist der Endlagerbau im Kristallin i.d.R. nicht problematisch. Meist ist kein spezieller Ausbau erforderlich, lediglich größere Störungszonen müssen genau charakterisiert, stabilisiert und ggf. abgedichtet werden. Wichtig für die Planung des Endlagerbergwerkes sind genaue Kenntnisse zur räumlichen Lage von Störungszonen, zum hydraulisch aktiven Klufnetzwerk sowie zur Orientierung und Größe der Gebirgsspannungen und zu möglichen Änderungen des Spannungsfeldes mit der Teufe bzw. mit fortschreitender Zeit.

Relativ häufig werden mit zunehmender Teufe in Verbindung mit komplizierten räumlichen Verschneidungen von Störungszonen sowie infolge von Variationen des morphostrukturellen Aufbaus der Störungen und der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine im Umfeld von Störungszonen Veränderungen des Spannungs- und Deformationszustandes der kristallinen Gesteine beobachtet. Dies kann Auswirkungen auf die Barriereigenschaften der Gesteine haben und muss bei der Planung bzw. Durchführung der bergmännischen Auffahrungen sowie bei ingenieurgeologischen Berechnungen und geomechanischen bzw. Transportmodellierungen berücksichtigt werden. Untersuchungen in URL's sowie auf Uranlagerstätten, die in kristallinen Gesteinen positioniert sind und natürlichen Analoga für HAW-Endlager entsprechen, belegen für zahlreiche Kristallingebiete deutliche Schwankungen in der Größe und Orientierung der

Gebirgsspannungen mit zunehmender Teufe. TALBOT & SIRAT (2001) wiesen für das URL Äspö mittels Hydrofracturing und Überbohrversuchen bis 230 m Teufe ein kompressives Regime mit vielen subhorizontalen, hydraulisch aktiven Störungen nach. Von 230 bis 500 m Teufe wurde ein Scherregime mit zahlreichen subvertikal orientierten Filtrationskanälen diagnostiziert, während im Teufenbereich 500 bis 800 m unterhalb der Erdoberfläche wieder Kompression dominiert. Gleichzeitig wichen die im Gebirgsverbund in ca. 450 m Teufe gemessenen Vertikalspannungen (13,4 bis 20,6 MPa) deutlich von den Ergebnissen geomechanischer Modellierungen (im Mittel 11,7 MPa, Abb. 13) ab. Die Spannungsvektoren wiesen in bestimmten Teufenlagen eine Drehung von bis zu 45° im Vergleich zum Teufenbereich bis 230 m auf (ASK 2003).

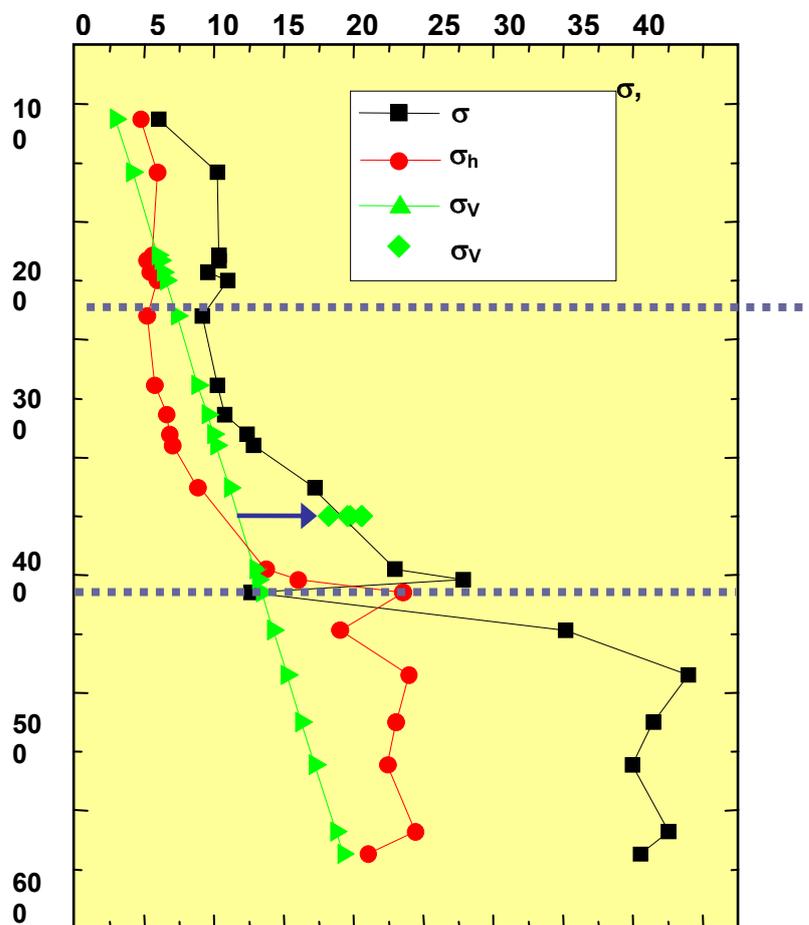


Abb. 13: Untertagelabor Äspö (Schweden) – teufenbezogene Änderung der Größe des Hauptnormalspannungsvektors (ASK 2003). Die Messungen der Spannungswerte erfolgten mittels Hydrofrac-Verfahren. σ_v – vertikaler Stress (Dreiecke – theoretische Werte, Rhomben – In-situ-Messergebnisse)

Ähnliche teufenabhängige Veränderungen der felsmechanischen und felshydraulischen Parameter wurden im Felslabor Grimsel sowie in dem zwischen 1983 und 1989 in einer Tiefe von 130 bis 420 m errichteten kanadischen URL Whiteshell (ca. 120 km NE Winnipeg, Provinz Manitoba), in den tiefen Erkundungsbohrungen an den detailliert untersuchten potenziellen finnischen Endlagerstandorten (Abb. 14) und auf der, an mächtige Störungszonen gebundenen Uranlagerstätte Antej (Südsibirien, ca. 120 km von Tschita) festgestellt. Im Felslabor Grimsel wurden als Ergebnis der intensiven alpidischen Orogenese deutliche teufenabhängige Schwankungen in den Stressbeträgen (15 bis 40 MPa) und Veränderungen in der Orientierung der Spannungsvektoren gemessen (PAHL et al. 1989).

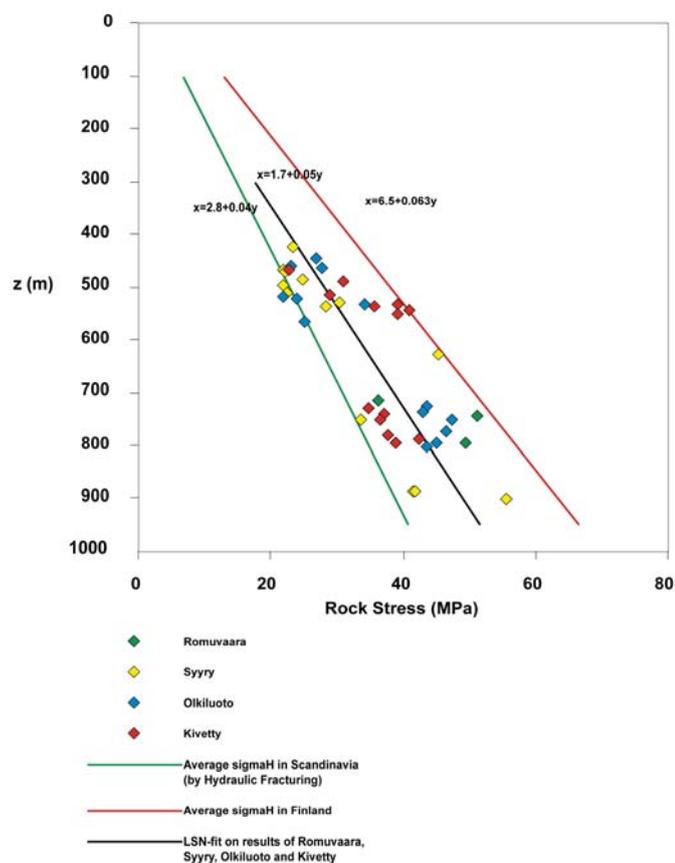


Abb. 14: Teufenabhängige Änderung der horizontalen In-situ-Spannungen in den kristallinen Wirtsgesteinen von vier potenziellen Endlagerstandorten in Finnland (Quelle POSIVA)

Auf der aktuell auf mehreren Sohlen in Abbau befindlichen russischen Uranlagerstätte Antej (Südsibirien, Gebiet Tschita) wurden infolge der komplizierten räumlichen Vernetzung mehrerer mächtiger Störungszonen Veränderungen in der Lage der Spannungsvektoren und der petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine im Umfeld der Störungen festgestellt (Abb. 15 und 16). Dies erfordert die Anwendung spezieller, aufwändiger Untersuchungsverfahren, stellt hohe Anforderungen an die Planung der bergmännischen Auffahrungen und verkompliziert den Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager (siehe HAMMER et al. 2009, LAVEROV et al. 2008).

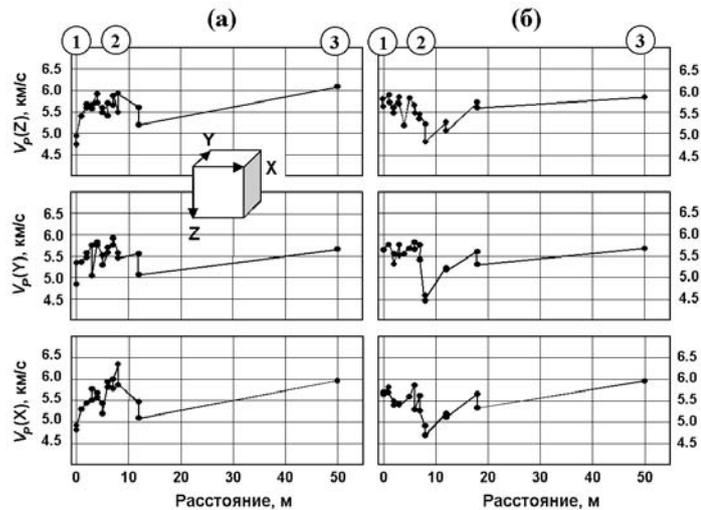


Abb. 15: Illustration der an Variationen der mineralogischen Zusammensetzung gebundenen deutlichen Veränderungen der Durchschallungsgeschwindigkeiten von granitoiden Gesteinen im Umfeld von 50 m von Störungszonen auf der 9. (a) und der 11. Sohle (б) der Lagerstätte Antej, Sibirien (x-Achse – Entfernung von der Störungszone in m; y-Achse – Durchschallungsgeschwindigkeiten in km/s). Auf der 9. Sohle besteht das unmittelbare Umfeld der in Störungszonen lokalisierten Uranmineralisation aus niedrig temperierten Chlorit-Glimmer-Gesteinen, während die Störungszonen auf der 11. Sohle intensiv verquarzt sind, was deutliche Unterschiede im geomechanischen Verhalten der Gesteine zur Folge hat (LAVEROV et al. 2008).

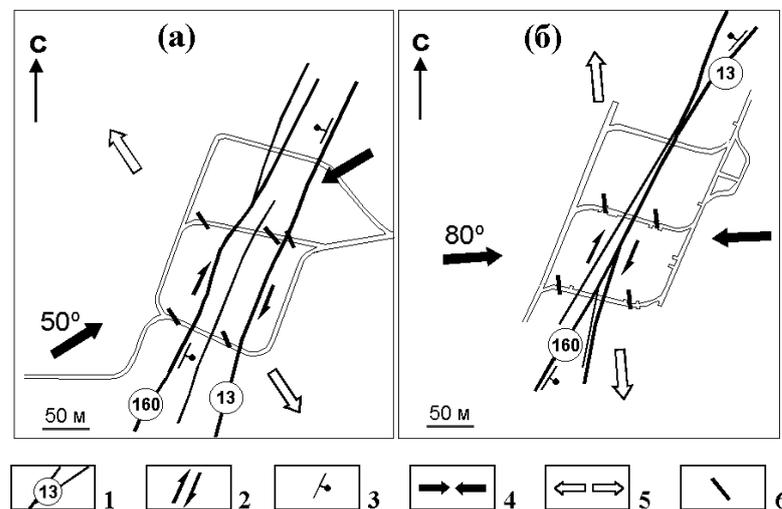


Abb. 16: Veränderung der Orientierung der Vektoren der maximalen horizontalen Kompression auf der 9. (a, + 182 m üNN) und 12. Sohle (б, +/- 0 m üNN) der Lagerstätte Antej (1 - Störungszonen und ihre Nummer, 2 – Richtung der Blockverschiebung entlang den Störungszonen, 3 – Einfallrichtung, 4 – Orientierung des Vektors der maximalen Kompression, 5 - Orientierung des Vektors der minimalen Kompression, 6 – Richtung der maximalen Deformation/Streckung vertikaler Auffahrungen, LAVEROV et al. 2008)

Die Wärmeleitfähigkeit von kristallinen Gesteinen ist etwas geringer als beim Steinsalz, aber höher als bei Tongesteinen. Sie kann deutlich schwanken. So z. B. wurden für die französischen Granite Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2,3 und 3,8 W/ms bestimmt, was in 500 m Teufe zu Gebirgstemperaturen zwischen 17 und 30 °C führen kann (ANDRA 2005b). Da die Temperaturen im Einlagerungsniveau wesentlichen Einfluss auf das Endlagerkonzept (so z. B. bestimmt die Gebirgstemperatur die für die Abfalleinlagerung bis zur Bentonitschädigung zur Verfügung stehende Temperaturspanne) und die Ausmaße des Endlagers haben, müssen sie im Vorfeld der Standortentscheidung genau untersucht werden. Dabei ist zu beachten, dass in anisotropen, z. B. geschichteten oder geschieferten Gesteinen die thermische Leitfähigkeit richtungsabhängig beträchtlich schwanken kann. Aufgrund der geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten stellen thermisch induzierte Spannungen im Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Kristallin in den meisten Fällen kein Problem dar. Allerdings können die durch die Zerfallswärme endgelagerter Abfälle thermisch induzierten Dichteströmungen den Schadstofftransport nachhaltig beeinflussen. Andererseits können Kluftsysteme mit deutlich höheren Durchlässigkeiten als die Gesteinsmatrix zur Herausbildung deutlicher Inhomogenitäten im Wärmefeld führen.

Problematisch für die Wahl eines Kristallingebietes als Endlagerstandort ist das mögliche Vorkommen von hydraulisch aktiven Grundwasserwegsamkeiten in den Gesteinen. Während die Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im ungeklüfteten Zustand, d. h. bei vielen im Labor durchgeführten Bestimmungen, meist sehr gering ist, weisen geklüftete Gesteinsbereiche in In-situ-Versuchen z. T. hohe bis sehr hohe Gebirgsdurchlässigkeiten auf (BRACE 1980, NAGRA 1994b). Abb. 17 illustriert am Beispiel einer im Verlaufe der geologischen Erkundung des Standortes Laxemar (Oskarshamn, Schweden) niedergebrachten Tiefbohrung die beträchtliche Schwankungsbreite der mittels Pumpversuchen gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten zwischen 10^{-6} und 10^{-12} m/s. Dabei wird offensichtlich, dass auch in größeren Tiefen stark durchlässige Gesteinsbereiche zu beobachten sind. Ausgehend von diesen Befunden stützt sich der Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Kristallin vor allem auf die Gewährleistung eines dichten Einschusses der Abfälle durch den Einsatz geeigneter technischer oder geotechnischer Barrieren (Behälter, Bentonit-Versatz).

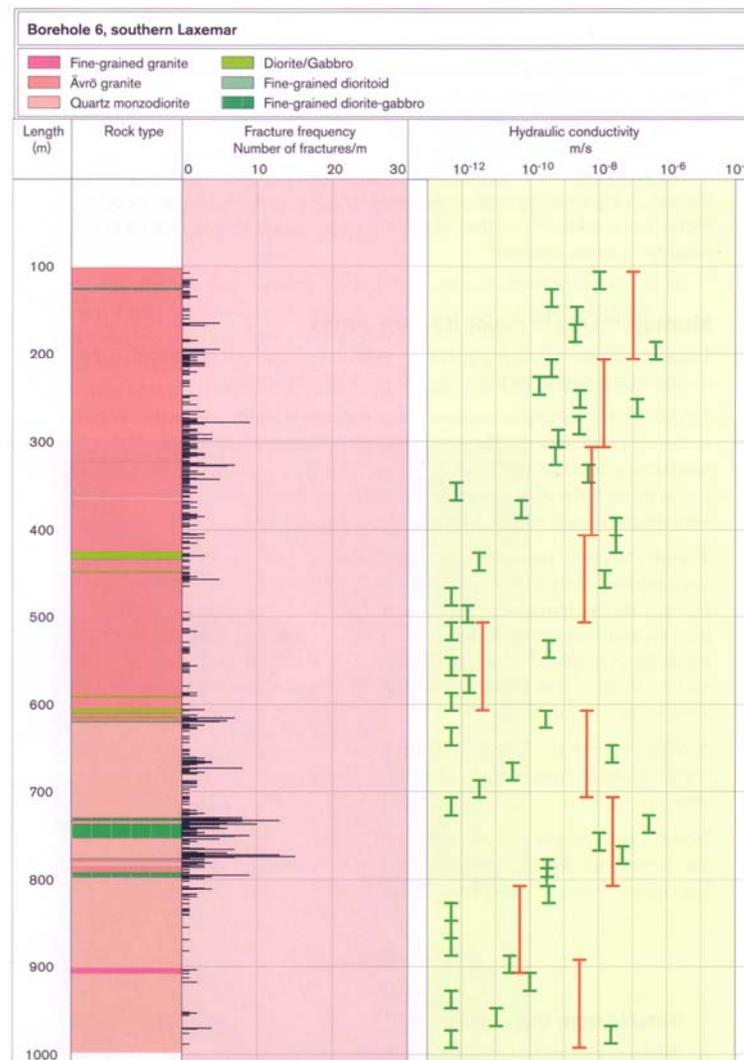


Abb. 17: Variationen der Klufthäufigkeiten (links) und hydraulischen Durchlässigkeiten (rechts) in einer ca. 1000 m tiefen Erkundungsbohrung am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Oskarshamn (SKB 2006a)

Auch die Untersuchungsergebnisse geohydraulischer Messungen an potenziellen finnischen Endlagerstandorten zeigen, dass trotz generell mit der Tiefe abnehmender Durchlässigkeiten in Kristallingebieten auch in größeren Tiefen noch stark durchlässige Störungszonen vorkommen können, die zu einem eingeschränkten Isolationspotenzial der geologischen Barriere führen könnten (Abb. 18). Kristalline Gesteine weisen oft ein sehr komplexes Muster von tektonischen Störungszonen und Klüften auf, das als Resultat einer oft langwierigen und mehrphasigen geologischen Entwicklung entstanden ist. Dabei ist für die Langzeitsicherheit eines Endlagers die kleinskalige Klüftung der Gesteine i.d.R. kein Problem (Durchlässigkeit meist kleiner als 10^{-9} m/s; ANDRA 2005a). Um die langfristige Standsicherheit der bergmännischen Hohlräume abzusichern, muss sie allerdings beim Bau des Endlagers berücksichtigt werden.

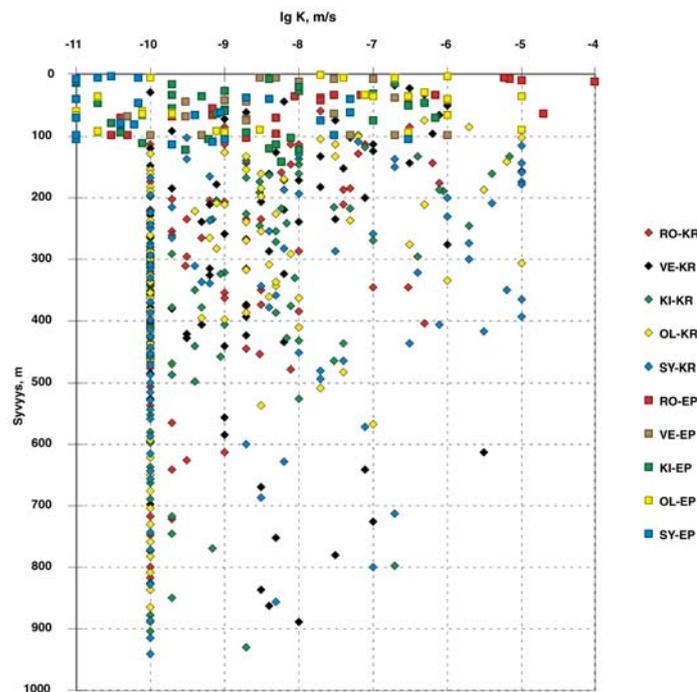


Abb. 18: Teufenbezogene Angaben zur Durchlässigkeit der in einer frühen Phase des finnischen Standortauswahlprozesses betrachteten potenziellen granitoiden Endlagerwirtsgesteine (RO - Romuvaara, VE - Veitsivaara, KI - Kivetty, OL - Oikiluoto, SY – Syyry; McEWEN & ÄIKÄS 2000)

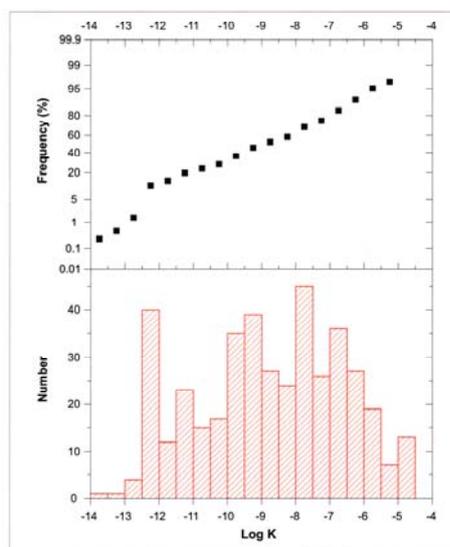


Abb. 19: Häufigkeitsverteilung der in 12 tiefen Erkundungsbohrungen am schwedischen Standort Laxemar (Oskarshamn) für jeweils 20 m mächtige Bereiche gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten (SKB 2007)

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit eines HAW-Endlagers im Kristallin ist kritisch, dass die Durchlässigkeit und Wasserführung von Kristallingesteinen oftmals räumlich stark veränderlich (Abb. 19) und damit kompliziert zu erkunden sowie schwer in ihrer weiteren Entwicklung zu prognostizieren sind. Trotz aufwändiger Standortuntersuchungen liegen in vielen Fällen nur ungenaue Kenntnisse zu den bereits bestehenden Kluftsystemen oder Störungszonen vor. Unklarheiten bestehen meist bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Kluft- bzw. Störungszonennetzwerkes und der sich möglicherweise stark verändernden Spannungsverteilungen im Gesteinsmassiv (Orientierung und Größe der Spannungsvektoren). Selbst wenn der Standort aktuell über günstige hydrogeologische Bedingungen für den Endlagerbau verfügt, sind häufig nur mit sehr großem Vorbehalt Prognosen dazu möglich, wie sich im Verlaufe der weiteren geologisch-tektonischen Entwicklung des Gesteinsmassives die Isolationseigenschaften der geologischen Barriere (speziell die Unterbindung advektiver Grundwasserbewegungen) zukünftig verändern können (MOROZOV et al. 2007, PETROV et al. 2008). Spannungsänderungen bzw. -umverteilungen infolge von tektonischen bzw. geodynamischen Prozessen, möglicherweise auch nur in den benachbarten geologischen Einheiten, können zu beträchtlichen Veränderungen der hydraulischen Eigenschaften von Klüften bzw. Störungszonen führen. Dies hätte auch Einfluss auf die Redoxverhältnisse in den Grundwässern (z. B. mögliches tiefes Absinken sauerstoffreicher Grundwässer) und auf die Sorptionseigenschaften der Wirtsgesteine bzw. Kluftminerale. Ein wesentlicher Schwerpunkt der Standorterkundungsarbeiten im Kristallin müssen demzufolge Untersuchungen zur Klüftigkeit der Gesteine bzw. zu ihrem tektonischen Gestörtheitsgrad sowie zu möglichen zukünftigen Änderungen der Spannungsverteilungen sein. Ziel ist die Abgrenzung von möglichst ungeklüfteten Gesteinsbereichen, für die perspektivische Veränderungen der geohydraulischen Standortrandbedingungen weitgehend ausgeschlossen werden können.

In vielen Modellrechnungen für den Radionuklidtransport in Kristallingesteinen wird von der Dominanz von Diffusionsprozessen mit sehr geringen Transportgeschwindigkeiten ausgegangen, z. B. 20 cm in 0,5 Mio. Jahren, basierend auf In-situ-Versuchen und Analoga-Studien (siehe SMELL & ROSHOLT 1984). Das wahrscheinliche Vorkommen von wasserführenden, hydraulisch aktiven Störungszonen im Kristallin führt allerdings dazu, dass im Unterschied zum Steinsalz und plastischen Tongestein nicht mehr die Diffusion den maßgebenden Prozess für den Radionuklidtransport darstellt, sondern die Advektion, mit deutlich höheren Grundwasserfließgeschwindigkeiten.

In endlagerrelevanten Teufen von 400 bis 1000 m sind die Grundwässer in kristallinen Gesteinen in vielen Fällen gering mineralisiert (z. B. 0,9 bis 1,4 g/l; NAGRA 2005) sowie schwach alkalisch und schwach reduzierend. Derartige Lösungen können nur eine geringe Korrosion der Endlagercontainer hervorrufen und weisen eine niedrige Radionuklid-Löslichkeit auf. Radionuklide sind nur in oxidierenden Wässern löslich. Die kristallinen Gesteine lösen sich in derartigen Grundwässern nicht, es kommt lediglich zu Alterations-

bzw. Verwitterungsprozessen, in deren Ergebnis in der Nähe von durchströmten Klüften Mineralum- bzw. -neubildungen erfolgen. Häufig wird bei derartigen sekundären Prozessen die Bildung von Mineralen mit erhöhtem Sorptionsvermögen (z. B. Kaolinit oder Montmorillonit) beobachtet. Diese Mineralbildungsprozesse erfordern allerdings deutlich höhere Temperaturen als 100 °C und laufen sehr langsam, d. h. über viele Mio. Jahre ab. Die neugebildeten Tonminerale stellen effektiv wirkende geochemische und Sorptionsbarrieren für aus dem Endlager möglicherweise freigesetzte Radionuklide dar (LAVEROV et al. 2002, 2008, PETROV 2001). Dies belegen auch die Untersuchungsergebnisse an Uranlagerstätten, die als natürliche Analoga für HAW-Endlager in kristallinen Gesteinen angesehen werden, wie z. B. El Berrocal in Spanien oder Kamaishi in NE Japan (ENRESA 1996, YOSHIDA et al. 2000). Trotz derartiger sekundärer Mineralbildungen verfügen kristalline Gesteine im Unterschied zu Steinsalz und plastischem Tongestein über kein kurzfristig wirksames Selbstheilungs- oder Selbstabdichtungsvermögen.

Selbst bei einem hohen Explorationsaufwand bleibt für Kristallinvorkommen infolge der möglichen Existenz von, in ihrer Langzeitentwicklung nur ungenau charakterisierbaren Grundwassermigrationswegen eine hohe Unsicherheit hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen eines Endlagers bestehen. Dies führte in vielen Ländern, die über andere potenziell geeignete Wirtsgesteine verfügen, zum Ausschluss (z. B. Deutschland) bzw. zur Rückstellung dieser Wirtsgesteinsoption (z. B. Schweiz) oder zur Formulierung zusätzlicher Standortanforderungen. Frankreich fordert ausgehend von den Ergebnissen regionaler Kristallinstudien eine mächtige zusätzliche Tonbarriere oberhalb von Granitvorkommen (CNE 1996, 1997, ANDRA 1999). U. a. infolge der damit verbundenen Schwierigkeiten bei der Suche und Erkundung eines solchen Standortes, hat Frankreich in den abschließenden Phasen des Standortsuchverfahrens die Idee einer Endlagerung im Granit nicht weiter forciert.

2.5 Einfluss der Wirtsgesteinseigenschaften auf die Endlagerkonzepte

Das Einlagerungskonzept für hochradioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen wird vor allem bestimmt durch:

- die, den nationalen geologischen und raumordnerischen Gegebenheiten angepasste Wahl des Endlagerwirtsgesteins,
- die Zusammensetzung, Langlebigkeit, Radiotoxizität, Wärmeleistung und Menge der radioaktiven Abfälle sowie
- die sich aus Langzeitsicherheitsbetrachtungen ergebenden Anforderungen an die einzelnen Komponenten des in den Endlagerprojekten genutzten Multibarrierensystems.

Die Unterschiede im geologischen Bau, im mineralogisch-geochemischen Stoffbestand sowie in den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonformationen und Kristallingesteine spiegeln sich in verschiedenen Endlagerkonzepten wider, die zusätzlich auf die konkreten Standortrandbedingungen zugeschnitten werden müssen.

In Abhängigkeit von den Endlager-relevanten Eigenschaften der verschiedenen Gesteinstypen und den geologischen Standortgegebenheiten wird die Hauptbarrierenwirkung entweder von der geologischen und/oder von den geotechnischen Barrieren übernommen. Unterschiede bzw. Beeinträchtigungen im Radionuklid-Rückhaltevermögen der geologischen Barrieren müssen durch eine geeignete, den Besonderheiten des jeweiligen Gesteinstyps angepasste Auslegung der technischen bzw. geotechnischen Barrieren ausgeglichen oder in ihren Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des Endlagers gemindert werden. Mögliche Beeinträchtigungen der geologischen Barriere („Störfallszenarien“) sind aufzuzeigen und gleichzeitig zu bewerten, welche Prozesse bzw. Faktoren unter welchen Bedingungen Einfluss auf den Ablauf und die Intensität bzw. das Ausmaß dieser Szenarien haben. In Zusammenarbeit mit Bergleuten und Ingenieuren müssen entsprechende Gegenmaßnahmen geplant werden.

Endlagerkonzepte für Steinsalz oder plastisch reagierende Tonformationen basieren aufgrund der Undurchlässigkeit und der Kriecheigenschaften auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle, d. h. vor allem auf der Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere. Schwerpunktartig muss das Wirtsgestein durch seinen strukturellen Aufbau bzw. seine mineralogisch-geochemischen Eigenschaften die Langzeitisolation der Abfälle gewährleisten. Wenn die geologische Barriere die Hauptlast beim Langzeitsicherheitsnachweis trägt, steigen die Anforderungen an die geologische Barriere und damit an die Standortauswahl und -charakterisierung. In diesen Konzepten wird davon ausgegangen, dass die Intaktheit der technischen und geotechnischen Barrieren maximal einige tausend bis zehntausend Jahre gegeben sein muss. Die Hauptlast bei der Gewährleistung der Langzeitsicherheit trägt das die Abfälle umgebende Gestein.

Für Endlagerkonzepte in Kristallingesteinen ist aufgrund der möglicherweise komplizierten, in ihrer langzeitlichen Entwicklung nur schwer vorhersehbaren Kluftnetzwerke und der oft schwierigen Strömungsverhältnisse in Kluftgrundwasserleitern vor allem der Nachweis der Langzeitbarrierenwirkung der technischen und geotechnischen Barrieren (Behälter, Bentonitversatz) erforderlich. Der Beitrag der geologischen Barriere zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers ist im Kristallin im Vergleich zum Salz oder plastischen Ton deutlich reduziert. Sie dient vor allem für die Schaffung einer geeigneten Umgebung zur Gewährleistung der Langzeitintegrität der (geo)technischen Barrieren. Zur Begrenzung der sich aus den struktureologischen Verhältnissen in vielen kristallinen Gesteinen ergebenden Unsicherheiten sind belastbare Standorterkundungsdaten erforderlich, aus denen die Anforderungen an die technischen und geotechnischen Barrieren abgeleitet werden.

Für alle Wirtsgesteinstypen, aber insbesondere für Endlagerkonzepte im Kristallin und im Tonstein müssen die technischen und geotechnischen Barrieren im Ergebnis aufwändiger In-situ- und Laborversuche optimiert und aufeinander abgestimmt werden. So z. B. stellt der Einsatz einer Bentonitbarriere in Kristallingesteinen (hydraulische und Sorptionsbarriere) spezielle Anforderungen an die maximal mögliche Temperaturbelastung im unmittelbaren Umfeld der Endlagerbehälter. Dieser Umstand wird durch die Entwicklung spezieller Behältertypen, Änderungen in der Behälterbeladung und -zwischenlagerzeit oder durch eine Erhöhung des Abstandes zwischen den Endlagerbehältern (verbunden mit einer Zunahme der Endlagergröße) ausgeglichen. Außerdem muss auch die Wechselwirkung der geotechnischen Barrieren bzw. der eingebrachten Materialien mit dem Gebirge untersucht werden (z. B. Gasentwicklung durch Korrosion).

Abb. 20 fasst die allgemeinen, sich vor allem aus den Wirtsgesteinseigenschaften ergebenden Eckpunkte der Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallingestein zusammen. Daraus sind deutliche Unterschiede hinsichtlich der Auslegung, der Errichtung und des Betriebs von Endlagerbergwerken in den verschiedenen Wirtsgesteinen ersichtlich.

Komponenten	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein
Einlagerungssohle	ca. 900 m	ca. 500 m	500 - 1200 m
Lagerungstechnik*	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher oder Strecken
Auslegungstemperatur	max. 200° C	max. 100° C	max. 100° C (Bentonitversatz)
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
Behälterkonzept	vorhanden	für Deutschland neu zu entwickeln	für Deutschland neu zu entwickeln
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	groß (Erzbergbau)

günstige Eigenschaft
 ungünstige Eigenschaft
 mittel

* wird an das jeweilige Wirtsgestein angepasst

Abb. 20: Zusammenfassung der allgemeinen Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (BGR 2006)

Eine wesentliche Besonderheit des Endlagerkonzeptes für Steinsalz besteht darin, dass die geotechnische Barriere nicht aus Bentonit sondern aus Salzgrus, ggf. vermischt mit geringen Anteilen barrierewirksamer Beimengungen, bestehen wird. Dies bietet den Vorteil einer im Vergleich zum Bentoniteinsatz höheren Temperaturdifferenz zwischen Endlagerbehälter und maximal möglicher Temperaturbelastung des Endlager-Nahfeldes, in diesem Fall 200 °C. Für Endlagerkonzepte im Ton bzw. für den in kristallinen Gesteinen vorgesehenen Einsatz von Bentonit reduziert sich die maximal mögliche Temperatur der Endlagerbehälter auf weniger als 90 - 95 °C, was längere Zwischenlagerzeiten und größere Abstände zwischen den Behältern zur Folge hat. Demgegenüber ermöglicht die geringere Temperaturempfindlichkeit von Steinsalz eine kürzere Zwischenlagerzeit der Abfälle sowie eine stärkere räumliche Konzentration der Abfälle, d. h. es wird eine geringere Endlagerfläche benötigt. Die im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinstypen doppelt bis dreimal so hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz unterstützt diesen Effekt und hat ebenfalls einen geringeren Platzbedarf für das Endlager im Vergleich zu Endlagerkonzepten in Tongesteinen oder im Kristallin zur Folge.

Außerdem schließt der bis auf den Endlagerbehälter völlige Verzicht auf wirtsgesteinsfremde, in ihrer Langzeitbeständigkeit bzw. -reaktion schlecht prognostizierbare Materialien im Endlagerkonzept für Steinsalz Interaktionen zwischen den geologischen und geotechnischen Barrieren aus. Gleichzeitig verhindert er die Bildung von Gradienten in den chemischen, hydraulischen und geomechanischen Eigenschaften des Endlagernahfeldes.

Aufgrund des erhöhten Kriechvermögens von Steinsalz bei erhöhten Temperaturen werden die eingelagerten Endlagerbehälter nach wenigen hundert bis tausend Jahren fest im Steinsalz eingeschlossen. Deshalb müssen die Behälter mechanisch auf den herrschenden Gebirgsdruck ausgelegt sein. Im deutschen Referenz-Endlagerkonzept ist eine Rückholung der Abfälle nicht vorgesehen. Technisch möglich wäre sie und durch den dichten Einschluss der Behälter auch einfacher als bei den anderen Wirtsgesteinstypen. In den Endlagerkonzepten für tonige Wirtsgesteine ist die Rückholbarkeit der Abfälle für einen auf 300 bis 400 Jahre begrenzten Zeitraum vorgesehen. Eine einfache Rückholbarkeit ist aber meist zeitlich auf die Betriebsphase und die kontrollierte Nachbetriebsphase des Endlagers begrenzt (NAGRA 2002b). Nach Verschluss des Endlagers wäre die Rückholung dagegen nur mit großem Aufwand möglich.

Solche, häufig als Nachteile des Salzes bei der HAW-Endlagerung bezeichneten Gesteinseigenschaften, wie geringes Sorptionsvermögen im Havariefall, hohe korrosive Wirkung von möglicherweise zutretenden Salzlösungen und hohe Wasserlöslichkeit von Steinsalz wurden in Kap. 2.2 in ihren langzeitsicherheitlichen Auswirkungen auf das Endlager bewertet. Zwecks weiterer Erhöhung der Langzeitsicherheit werden bei der Standortauswahl z. B. ein geeigneter Internbau des Salzstocks und ein spätes Entwicklungsstadium der nicht zu oberflächennah positionierten Salzstruktur

gefordert (siehe auch Kap. 3.3.1). Die natürlichen Ablaugungsprozesse werden in den Endlagerkonzepten für Steinsalz durch eine ausreichende Mächtigkeit der Salzbarrieren zum Deck- und Nebengebirge berücksichtigt.

Das Einlagerungskonzept für HAW in Tonen/Tongesteinen ist stark abhängig von dessen spezifischen Eigenschaften, die sich aus der Lithologie, der Textur, dem Gefüge und dem Diageneseegrad ergeben. Günstige Eigenschaften haben meist verfestigte mesozoische Tonsteine mit hohem Tonanteil, die abseits von großen Bruchstrukturen liegen und einen mittleren Diageneseegrad aufweisen. Stärker diagenetisch oder metamorph überprägte Tonsteine oder Tonschiefer neigen zur Kluffbildung und Schieferung, mit ähnlichen Konsequenzen für das Endlagerkonzept wie bei kristallinen Wirtsgesteinen (zusätzliche Bentonitbarriere und längere Containerstandzeiten erforderlich) und werden in den europäischen Endlagerkonzepten nicht betrachtet. Für Endlager in plastischen Tonen sind meist sehr aufwändige Ausbau- und Sicherungsmaßnahmen notwendig, an die langzeitliche Unsicherheiten bezüglich der Wechselwirkungen zwischen den Ausbaumaterialien und dem Wirtsgestein gebunden sein können. Interaktionen der Ausbaumaterialien mit den Endlagerbehältern oder der geotechnischen Barriere können zur Gasbildung sowie zu Veränderungen des chemischen Milieus führen. Plastische Tone werden in Deutschland ebenfalls als nicht geeignet eingestuft.

Die vergleichsweise geringe Temperaturleitfähigkeit und thermische Belastbarkeit von tonigen Gesteinen führt dazu, dass die durch die Abfallwärme hervorgerufene maximale Umgebungstemperatur der Endlagerbehälter wegen der möglichen Veränderungen der physikochemischen und geomechanischen Eigenschaften der Tonminerale 90 - 95 °C nicht überschreiten darf (zum Vergleich Steinsalz: 200 °C). Dies bedingt eine längere Zwischenlagerzeit und ein im Vergleich zum Salz wesentlich erhöhtes Wirtsgesteinsvolumen zur Einlagerung der Abfälle (größere Abstände zwischen Containern erforderlich). Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Tone bzw. der Bentonitbarriere und ihre z. T. hohen Wassergehalte führen auch dazu, dass umfangreiche Forschungsarbeiten zur Erhöhung der Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren und zur Entwicklung eines geeigneten langzeitsicheren Abfallbehälters erforderlich sind.

Die sehr geringe Hohlraumstabilität in plastischen (oberflächennah lagernden) Tonformationen und langzeitsicherheitliche Überlegungen (möglichst großer Abstand zur Biosphäre) sprechen für den Endlagerbau in tief gelegenen Tongesteinen. Allerdings erhöhen sich mit zunehmender Teufe der Verfestigungs- bzw. Metamorphosegrad der tonigen Gesteine, die Gebirgstemperatur und die Kosten des Endlagers. Geeignete Teufen werden i.d.R. zwischen 200 m und 800 m angenommen. Die in größerer Teufe herrschenden höheren Gebirgsdrücke und vor allem höheren Gebirgstemperaturen haben wesentlichen Einfluss auf die Auslegung des Endlagers bzw. das Endlagerkonzept. Die aufgrund höherer Gebirgstemperaturen geringere Temperaturdifferenz zwischen Endlagerbehälter

und Maximalbelastung der Bentonitbuffers erfordert längere Zwischenlagerzeiten, größere Abstände zwischen den Containern und den Einlagerungsbohrungen bzw. -strecken und damit ein größeres Einlagerungsvolumen, das im Ergebnis der Standorterkundung nachgewiesen werden muss.

Für Endlagerkonzepte in kristallinen Gesteinen gewinnen aufgrund des eingeschränkten Isolationspotenzials der i.d.R. geklüfteten geologischen Barriere die Lebensdauer der Abfallbehälter und die Wirksamkeit des Bentonit-Buffers zur Abschirmung von möglicherweise zutretenden Grundwässern oder austretenden Radionuklid-haltigen Wässern an Bedeutung. Im finnischen Konzept für ein HAW-Endlager in granitoiden Gesteinen wird darauf hingewiesen (VIRA 2008), dass das Endlagerkonzept insbesondere:

- hinsichtlich eines möglichen Eindringens von Grundwässern,
- in Bezug auf das EDZ- und Erkundungsbohrungen-Managements sowie
- bezüglich der für die technischen/geotechnischen Barrieren verwendeten Materialien

kritisch zu hinterfragen bzw. permanent zu optimieren ist.

An vielen Kristallinstandorten haben außerdem häufig zu beobachtende Wechsel in der lithologischen Zusammensetzung der Gesteine und in der Intensität ihrer Deformation sowie unregelmäßige räumliche Verteilungen von Gesteinen mit unterschiedlichen petrophysikalischen Eigenschaften entscheidenden Einfluss auf die Planung des Endlagers und die sichere Dimensionierung der geotechnischen Barrieren. Ein Endlager in kristallinen Gesteinen muss infolge dieser Unsicherheiten wahrscheinlich in mehrere Bereiche aufgeteilt werden, was einen großen Flächenbedarf und hohe Kosten für den Endlagerbau zur Folge hat. Außerdem kann eine mächtige sedimentäre Überdeckung der Granitoidkomplexe die geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten verkomplizieren, wie z. B. die Abgrenzung von hydraulisch aktiven Störungszonen bzw. die Ausweisung von möglichst homogenen Gesteinsblöcken.

In Endlagerkonzepten für kristalline Gesteine sind hinsichtlich der Standsicherheit der untertägigen Hohlräume i.d.R. keine zusätzlichen Ausbaumaßnahmen erforderlich. Allerdings sind vorsorglich Maßnahmen zur Gefahrenabwehr für den Fall zu planen, dass im Verlaufe des Endlagerbaus mächtige, hydraulisch aktive Störungszonen aufgeschlossen werden, an die signifikante Grundwasserzuflüsse gebunden sind. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass im Ergebnis jeder Standorterkundung in Magmatiten bzw. Metamorphiten i. d. R. nur eingeschränkte Kenntnisse über die vorhandenen, möglicherweise kompliziert vernetzten und in ihrer Langzeitentwicklung nur schwer zu bewertenden Kluft- und Störungszonensysteme vorliegen. Im Zusammenhang mit den damit verbundenen Unsicherheiten ist im Rahmen der Entwicklung des Endlagerkonzeptes

zu klären, was die technischen bzw. geotechnischen Barrieren leisten müssen, damit der Langzeitsicherheitsnachweis ohne Abstriche geführt werden kann. Aufgrund der Bedeutung der technischen und geotechnischen Barrieren spielen für den Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers in kristallinen Gesteinen die Auslegung und Charakterisierung des Nahfeldes eine größere Rolle als in anderen Wirtsgesteinstypen.

Obwohl kristalline Gesteine selbst keine hohen Temperaturempfindlichkeiten aufweisen, gelten aufgrund des Einsatzes von Bentonit als zusätzlicher Barriere (Abschirmung von Grundwasserzutritten und Sorption von möglicherweise aus dem Endlager austretenden Radionukliden) ähnliche Einschränkungen in Bezug auf die maximal mögliche Temperaturbelastung wie bei den Tongesteinen. Dies hat im Vergleich zur Einlagerung in Steinsalz einen erheblich höheren Platzbedarf (ca. 10 km² im Vergleich zu etwa 3 km² im Steinsalz) und finanziellen Aufwand zur Folge. Wird die angegebene Temperaturgrenze überschritten, so kommt es über Veränderungen im Tonmineralbestand und über temperaturinduzierte Schrumpfungen zu Beeinträchtigungen in den mechanischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften des Bentonitbuffers.

Im Gegensatz zur Endlagerung im Steinsalz muss der, zur Senkung der Korrosion mit einer Kupferummantelung versehene Endlagerbehälter im Kristallin mechanisch nur nach dem vorherrschenden hydrostatischen Druck bzw. nach dem Schwelldruck des umgebenden Buffermaterials ausgelegt werden. Der für die Endlagerung im Steinsalz bzw. für die dabei zur Anwendung kommenden Abfallbehälter entscheidende lithostatische Druck spielt im Kristallin aufgrund der hohen Gebirgsfestigkeit und der geringen Konvergenz nur eine geringe Rolle.

3 Standortanforderungen und Auswahlkriterien für Endlagerstandorte

Eine langfristig sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist entsprechend den Empfehlungen der IAEA (1990) nur in tiefen geologischen Formationen und bei Zugrundelegung eines Mehrbarrierensystems, bestehend aus geologischer Barriere und technischen bzw. geotechnischen Barrieren, möglich. Dadurch wird der Schutz der Biosphäre vor den Auswirkungen der radioaktiven Substanzen gewährleistet. Das aufgrund der nationalen geologischen Gegebenheiten zur Verfügung stehende Endlagerwirtsgestein ist maßgeblich für die Vorgehensweise und die Auswahlkriterien bei der Standortsuche sowie für die Auslegung und die erforderlichen Eigenschaften der zur Anwendung kommenden geotechnischen Barrieren. In den Endlagerkonzepten für Salzformationen und plastisch reagierende Tone muss die geologische Barriere des Endlagers eine zuverlässige Langzeitisolation der Radionuklide garantieren, unterstützt durch unabhängig davon wirkende technische und geotechnische Barrieren. In Endlagerkonzepten für kristalline Gesteine und intensiv metamorph überprägte Tonsteine weist die geologische Barriere aufgrund des höchstwahrscheinlichen Vorkommens hydraulisch aktiver Klüfte im Vergleich

dazu ein eingeschränktes Isolationsvermögen auf. In diesen Wirtsgesteinstypen müssen vor allem die Endlagerbehälter und geeignete geotechnische Barrieren die Mobilisierung der radioaktiven Stoffe in die Biosphäre deutlich verzögern oder ganz verhindern.

Zu den Anforderungen an Endlagerstandorte bzw. zu den Bewertungs- und Entscheidungskriterien bei der Standortsuche und -auswahl liegen seit Mitte der 1970er Jahre zahlreiche, unter Schirmherrschaft der IAEA verfasste Ausarbeitungen und Empfehlungen internationaler (z. B. IAEA 1977, CCE 1992, IAEA 1994) und nationaler Organisationen vor (z. B. NRC 1996, BORK et al. 2001, AKEND 2002, SKI 2002, BFE 2008, ANDRA 2005d, NAGRA 2008a-c, SKB 1998, NUMO 2004). Neben geowissenschaftlichen Eignungskriterien, zu denen international weitgehender Konsens besteht, werden im Auswahlprozess mit unterschiedlicher länderspezifischer Wichtung auch sozial- und umweltpolitische sowie raumordnerische Standortfaktoren berücksichtigt.

Im deutschen Referenz-Endlagerkonzept für hochradioaktive Abfälle in tiefen Steinsalzformationen kommt der geologischen Barriere die entscheidende Bedeutung zu (FILBERT & ENGELMANN 1998). Der Endlagerstandort muss demzufolge prioritär geowissenschaftliche Kriterien erfüllen. Als Grundlage für die Ableitung der Standortanforderungen dienen die, sich aus Langzeitsicherheitsanalysen ergebenden, prinzipiell möglichen Freisetzungsmechanismen von Radionukliden aus Endlagern. Bei der Ausarbeitung der Standortanforderungen sind folgende geologische Prozesse („Störfallszenarien“) der möglichen Freisetzung von Radionukliden zu betrachten:

- Freilegung des Endlagers durch Erosion bzw. Hebung in den Bereich aktiver Fließbewegungen oxidierender Grundwässer,
- Zerstörung des Endlagers durch tektonische (inklusive seismische) Prozesse,
- Schädigung bzw. Zerstörung der geologischen Barriere durch Veränderungen des regionalen oder lokalen Spannungsfeldes (Öffnung bereits vorhandener Kluftsysteme oder Bildung neuer Klüfte durch geotektonische Prozesse in benachbarten Regionen),
- Zerstörung des Endlagers und Transport der Radionuklide durch magmatische Schmelzen oder postmagmatische Fluide,
- Austrag der Radionuklide durch Grundwässer, die aus dem Deck- bzw. Nebengebirge in das Endlager migrieren sowie
- bewusste oder unbewusste Öffnung des Endlagersystems durch bergmännische oder geologische Arbeiten.

Daraus lässt sich zusammenfassend ableiten, dass zur Minimierung des Risikos einer Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre ein wenig bis nicht geklüftetes, gering durchlässiges Wirtsgestein in einem leicht kompressiv beanspruchten und seismisch bzw. tektonisch ruhigen Gebiet angestrebt wird.

3.1 Wirtsgesteinsunabhängige geowissenschaftliche Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen

Ausgehend von den genannten Störfallszenarien wurden für Deutschland folgende wirtsgesteinsunabhängige geowissenschaftliche *Ausschlusskriterien* für HAW-Endlagerstandorte abgeleitet (AKEND 2002):

- Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 (2005).
- In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorhanden sein.
- Die Endlagerregion darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im zu prognostizierenden Zeitraum aufweisen.
- Im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungszonen vorliegen.

Die Gefahren einer Freilegung des Endlagers bzw. einer drastischen Reduzierung der Mächtigkeit der geologischen Barriere sowie der Schaffung neuer Grundwasserwegsamkeiten durch Verwitterungs- und Erosionsprozesse werden durch nur schwach ausgebildete Hebungstendenzen und daran gebundene geringe Erosionsgeschwindigkeiten minimiert. Aufgrund dieser Forderung scheidet Standorte im Hochgebirge aus, da für diese Bereiche i. d. R. stark erhöhte Erosionsgeschwindigkeiten typisch sind. Die Endlagerregion sollte sich durch möglichst große Unterschiede in den Tiefenlagen der für das Ende des vorgegebenen Isolationszeitraumes prognostizierten Erosionsbasis und des geplanten Einlagerungsbereiches auszeichnen.

Die Anwendung der Ausschlusskriterien führt bereits in frühen Phasen des Standortsuchprozesses zu einer systematischen Reduzierung der Anzahl und Größe potenziell geeigneter Standortregionen. Abb. 21 zeigt die in Deutschland als ungeeignet für den Endlagerbau ausgewiesenen Regionen als Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien „seismische Aktivität größer 1“ und „vulkanisches Risiko“.

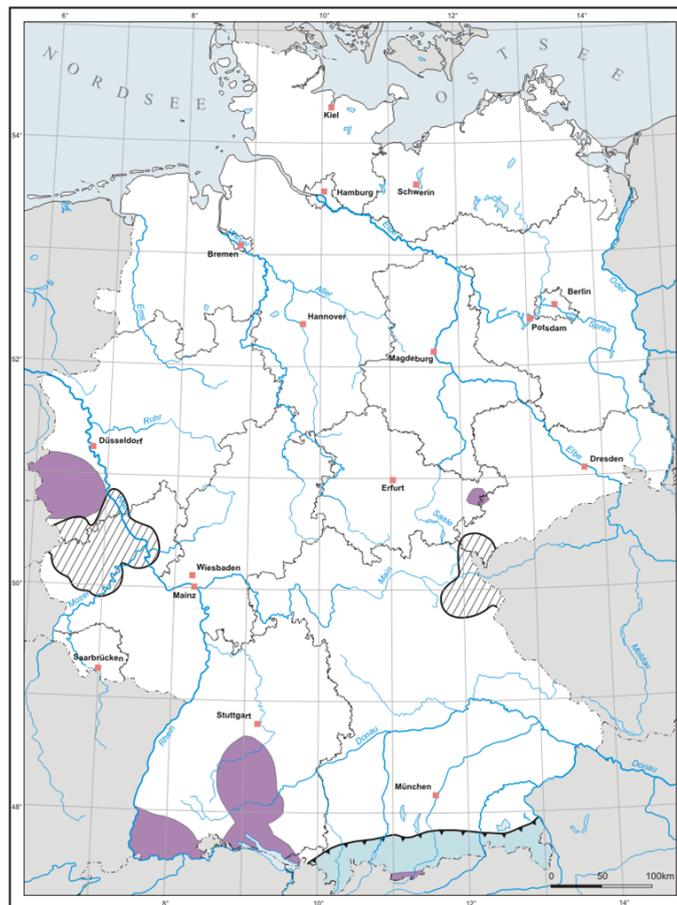


Abb. 21: Geographische Lage der durch die Anwendung der Ausschlusskriterien „seismische Aktivität“ und „vulkanische Gefährdung“ als ungeeignet für die HAW-Endlagerung bewerteten Regionen innerhalb Deutschlands (violett – erhöhte seismische Gefährdung, d. h. seismische Zone > 1 nach DIN 4149; schraffiert – vulkanische Gefährdung; HOTH ET AL. 2007)

Zusätzlich zu diesen Ausschlusskriterien wurden unter Zugrundelegung generischer Langzeitsicherheitsanalysen und vorläufig erstellter Endlagerkonzepte folgende weitgehend wirtsgesteinsunabhängige *Mindestanforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation* erarbeitet (AkEND 2002 – leicht geändert):

- Die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches müssen Gebirgsdurchlässigkeiten kleiner 10^{-10} m/s aufweisen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
- Die Tiefenlage der oberen Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m uGOK betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500 m uGOK liegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige

Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt.

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein.
- Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit, Tiefenlage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

Parallel zur Nutzung der genannten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen führt die Anwendung raumordnerischer, sozialpolitischer, umweltpolitischer und ökonomischer Kriterien zu weiteren Einschränkungen bei der Ausweisung untersuchungswürdiger Gebiete. Dazu zählen z. B. Bevölkerungsdichte, fehlende Infrastruktur für den Transport der Abfälle, noch nicht erschlossene, aber wirtschaftlich bedeutende Rohstoffvorkommen, Sicherheitsabstände zu bereits im Abbau befindlichen Lagerstätten bzw. zu anderen Untergrundnutzungen (z. B. Erdgas- und Grundwasserförderung, Gasspeicherung, Geothermie), Nähe zu Natur- und Landschaftsschutzgebieten sowie Vorhandensein von Altbergbau in den zur Auswahl stehenden geologischen Einheiten.

Die weltweiten Erfahrungen in der Umsetzung von Endlagerprojekten zeigen, dass durch eine breite Beteiligung der interessierten Öffentlichkeit die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des schrittweise durchzuführenden Entscheidungsprozesses erhöht wird. Dies führt zu einer Zunahme der Akzeptanz der Projekte in der Bevölkerung, senkt das Misstrauen gegenüber den Grundlagen für die Entscheidungsprozesse und erhöht die Glaubwürdigkeit der am Auswahlprozess beteiligten Einrichtungen.

Ungeachtet einiger länderspezifischer Besonderheiten unterscheiden sich international die den Standortauswahlprozessen zugrunde gelegten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen nur wenig (siehe Kap. 4). So z. B. hat in der Schweiz die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) bei der Standortauswahl für ein Endlager in Tongesteinen die Reduzierung der Anzahl der in Frage kommenden Regionen entsprechend den Anforderungen und Sicherheitsüberlegungen der IAEA vorgenommen. Dabei wurden folgende *übergeordnete* Auswahlkriterien eingesetzt (Abb. 23, NAGRA 2002a, 2008c):

- geologische Langzeitstabilität,
- günstige Wirtsgesteinseigenschaften,
- genügende Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers,

- Vermeidung von Störeinflüssen (z. B. Risiko für menschliches Eindringen),
- Robustheit gegenüber Störeinflüssen (z.B. bei konkurrierender Nutzung),
- leichte Explorierbarkeit (z. B. einfacher geologischer Bau, homogenes Gestein),
- gute Prognostizierbarkeit (z. B. großflächig geologisch-tektonisch ruhiges Umfeld) sowie
- technische Machbarkeit.

Das weitere Vorgehen zur Findung eines Standortes in der Schweiz wurde mit Hilfe des „Sachplanes geologische Tiefenlager“ festgelegt (BFE 2008). Darin werden *erweiterte* Kriteriengruppen und die eigentlichen Kriterien zur Auswahl eines potenziellen

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Durchlässigkeit 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Endlagerstandortes weiter spezifiziert und erläutert (Abb. 22).

Abb. 22: Insbesondere in Bezug auf die Langzeitsicherheit und technische Machbarkeit der Endlagerbergwerkes ausgerichtete Kriterien zur Standortevaluation für ein HAW-Endlager in der Schweiz (BFE 2008, aus: NAGRA 2008c)

Mit Fortschreiten des sukzessive durchzuführenden Auswahlprozesses werden zunehmend konkretere Anforderungen an den potenziellen Endlagerstandort formuliert. So z. B. fordert die NAGRA (2005) für das Endlagerwirtsgestein:

- eine hydraulische Durchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s,
- eine Mächtigkeit größer 100 m,
- eine genügende Standfestigkeit sowie

- kein Potenzial zur Verkarstung.

Dem französischen Standortauswahlverfahren werden Anforderungen an einen Endlagerstandort zugrunde gelegt (DSIN 1991), die den in der Schweiz angewendeten Kriterien ähneln. Per Gesetz wurden die folgenden Mindestanforderungen für einen eignungshöffigen Standort festgeschrieben (siehe auch Kap. 4.3):

- geodynamische Langzeitstabilität,
- keine Grundwasserzirkulation im und in direktem Kontakt mit dem Wirtsgestein,
- geeignete mechanische und thermische Eigenschaften des Wirtsgesteins,
- Rückhaltevermögen des Wirtsgesteins für radioaktive Substanzen,
- geeignete Tiefenlage hinsichtlich der Langzeitsicherheit sowie
- keine Rohstoffe im Bereich des geplanten Endlagers.

Ausführlichere Darstellungen der den Standortauswahlverfahren in den verschiedenen Ländern und Wirtsgesteinstypen zugrunde gelegten Kriterien sind in Kap. 4 enthalten. Dabei werden trotz der dargestellten Gemeinsamkeiten sowohl nationale Besonderheiten in der Vorgehensweise der Länder und in den Rahmenbedingungen der Auswahlverfahren sowie auch in den genutzten wirtsgesteinsspezifischen Auswahlkriterien offensichtlich.

3.2 *Zusätzliche, weitgehend wirtsgesteinsunabhängige geowissenschaftliche Standortauswahlkriterien*

Die in Kap. 3.1 genannten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen lassen sich durch weitere, weitgehend wirtsgesteinsunabhängige geowissenschaftliche Auswahlkriterien präzisieren und ergänzen, wodurch eine weitere Reduzierung der Standortalternativen im Verlauf des Auswahlverfahrens ermöglicht wird. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen:

a) geologische Gesamtsituation

- geringe Erosionsgeschwindigkeiten. Die Intensität von Erosionsprozessen wird vor allem von der Hebungsgeschwindigkeit, vom Relief, vom Klima und von den Eigenschaften der Gesteine, z. B. Klüftungsgrad und mineralogische Zusammensetzung bestimmt. Eine Bewertung der Auswirkungen dieser Einflussfaktoren auf die Erosionsprozesse in der geplanten Endlagerregion setzt entsprechende Detailkenntnisse voraus.
- geringe Gefahr externer Störeinflüsse, wie z. B. Vergletscherungen

(Erosionsrinnen, Stauchmoränen), Überschwemmungen oder drastische Klimaänderungen (z. B. Permafrost, kryogene Risse),

- ruhige geodynamische Entwicklung des Standortes in der geologischen Vergangenheit,
- geringe tektonische Zerblockung,
- gute Prognostizierbarkeit der weiteren geologischen Entwicklung,
- geringer geothermischer Tiefengradient, d. h. relativ geringe Gebirgstemperaturen im geplanten Einlagerungsniveau,
- ausreichender Sicherheitsabstand zu anderen Untergrundnutzungen (z. B. Erdöl-/Erdgas-Förderung, Speicherkavernen, Geothermie),

b) hydrogeologische Standortanforderungen

- lange Grundwasserfließzeiten bzw. hohes Grundwasseralter im geplanten Einlagerungsniveau (idealerweise Ausschluss eines Kontaktes der Endlagerbehälter mit Grundwässern),
- niedrige hydraulische Gradienten,
- große Entfernungen zum Vorfluter,
- gute Prognostizierbarkeit möglicher Änderungen der Grundwasserfließverhältnisse im Verlaufe der weiteren geologischen Entwicklung,
- ungünstige geochemische Bedingungen für die Freisetzung und den Transport von Radionukliden (z. B. reduzierende, gering mineralisierte Grundwässer, geringe Gehalte von Komplexbildnern oder Kolloiden) sowie
- günstiges chemisches Milieu für die Radionuklidsorption.

c) Anforderungen an die Wirtsgesteinseigenschaften

- möglichst homogene Zusammensetzung des weitgehend klutfreien Wirtsgesteins,
- gute Explorierbarkeit sowie Prognostizierbarkeit der Eigenschaften des Wirtsgesteins,
- hohe Standfestigkeit des Gesteins,
- gute Wärmeleitfähigkeit sowie eine geringe thermische Ausdehnung des Endlagerwirtsgesteins,

- hohe Strahlungsbeständigkeit,
- möglichst geringe Anisotropie der physikomechanischen Eigenschaften des Gesteins,
- geringe und in ihrer räumlichen Orientierung möglichst beständige Gebirgsspannungen sowie
- hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide.

Günstigstenfalls weist das Wirtsgestein unter endlagerrelevanten In-situ-Bedingungen ein plastisch-viskoses Deformationsverhalten (hohe Elastizitätswerte) ohne Dilatanz (d. h. ohne Rissbildung noch vor dem Bruch) sowie eine nur geringe Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität auf (AK_{END} 2002). Ein weiteres wichtiges Indiz für die Eignung eines Standortes ist das weitgehende Fehlen von sekundären Alterationsprodukten mit geringen Bildungsaltern im geplanten Einlagerungsniveau. Dies beweist, dass in der jüngeren geologischen Vergangenheit im Tiefenbereich des geplanten Endlagers keine intensiven Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen stattgefunden haben.

Eine besondere Bedeutung als Auswahlkriterium hat bereits in frühen Phasen der Standortsuche die Tiefenlage des geplanten Endlagerbergwerkes. Sie hat erheblichen Einfluss auf die bergmännischen Rahmenbedingungen und die bautechnische Machbarkeit sowie die Stabilität des Endlagerbergwerkes. Sie bestimmt die Umgebungs- bzw. Gebirgstemperatur, die insbesondere in Tonen bzw. beim Einsatz einer Bentonitbarriere im Kristallin möglichst gering sein muss, um die durch die Tonbarrieren vorgegebene obere Temperaturgrenze (etwa 90 - 95 °C) bei der Einlagerung der Abfälle nicht zu überschreiten oder den Flächenbedarf für das Endlager deutlich zu steigern. Die maximale, durch die HAW-Abfälle verursachte Wärmebelastung der tonigen Wirtsgesteine sollte am Kontakt Gebirge/Behälter nach NAGRA (2002a) 95 °C und nach ANDRA (2005d) 90 °C nicht überschreiten. Die Festlegung dieser Temperaturobergrenze beruht auf Modellrechnungen (ANDRA 2005d; inklusive 10 °C Sicherheit zu den berechneten 100 °C) und auf einer Analyse des Diageneseverlaufes für den schweizerischen Opalinuston (NAGRA 2002a).

Abb. 23 dokumentiert die Temperaturverteilung im Untergrund Deutschlands in 1000 m Tiefe. Deutlich ersichtlich ist, dass insbesondere in Süddeutschland große Gebiete durch relativ hohe Gebirgstemperaturen im für den Endlagerbau relevanten Teufenbereich charakterisiert sind, was eine nur geringe Temperaturspanne für die Abfalleinlagerung ergibt.

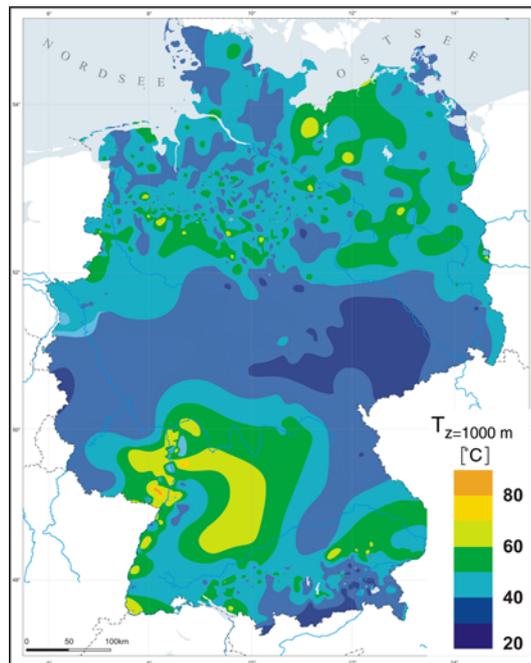
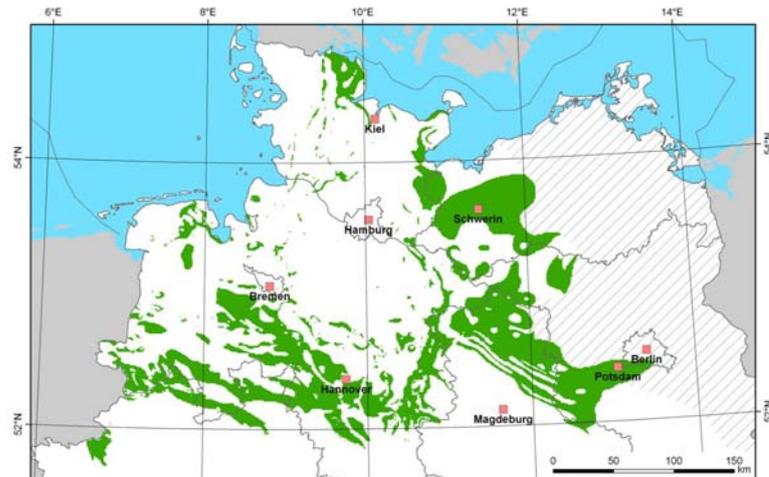


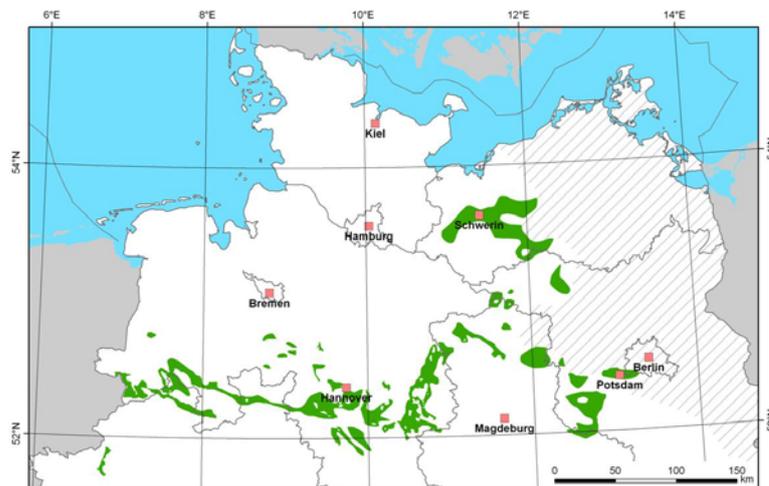
Abb. 23: Temperaturverteilung für den Untergrund Deutschlands in einer Tiefe von -1000 m uNN (HOTH et al. 2007)

Die Wahl der Tiefe jedes Endlagers stellt einen Kompromiss zwischen den Anforderungen aus den Langzeitsicherheitsbetrachtungen (möglichst tief zur Gewährleistung der langfristigen Integrität der geologischen Barriere) und den bergmännischen bzw. endlagerkonzeptionellen Vorgaben (relativ flach wegen Standfestigkeit und Umgebungstemperatur) dar. Sie muss zum einen den notwendigen Sicherheitsabstand zur Biosphäre gewährleisten und zum anderen den an große Tiefen gebundenen höheren In-situ-Temperaturen und möglicherweise schwierigeren gebirgsmechanischen Verhältnissen Rechnung tragen.

Zur Unterstützung und Veranschaulichung der Entscheidungsgrundlagen für den häufig auf sehr komplexen und umfangreichen Daten beruhenden Standortauswahlprozess können GIS-basierte Fachinformationssysteme eingesetzt werden. Dabei wird durch eine raumbezogene Visualisierung der geowissenschaftlichen, sozialpolitischen, ökonomischen und raumordnerischen Informationen (z. B. seismische Aktivität, vulkanische Gefährdung, rezente vertikale Erdkrustenbewegungen, Stauhaltung/Seen/Hauptvorfluter, Schutzgebiete, Abstand zur Staatsgrenze) die kriteriengestützte Auswahl von Standortregionen erleichtert. Insbesondere durch die Kombination dieser kriterienbezogenen Daten mit Geofachinformationen (z. B. Karten zur Flächennutzung und zu Rohstoffvorkommen, zu Mächtigkeiten und Tiefenlage bestimmter geologischer Horizonte, zu Epizentren und rezenten Krustenbewegungen, zur Temperaturverteilung in der



oberen Kruste) wird die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Standortentscheidungen



verbessert (Abb. 24).

- a) angewandte Kriterien: Mächtigkeit größer 100 m, Tiefe weniger als 1500 m
- b) Mächtigkeit größer 100 m, Tiefe größer 300 m und weniger als 1000 m, Verbreitungsfläche größer 10 km²

Abb. 24: Beispiele für die Anwendung von Standortauswahlkriterien im Rahmen der Bewertung der unterjurassischen norddeutschen Tonvorkommen hinsichtlich ihrer Eignung für ein Endlager für HAW (HOTH et al. 2007).

Deutlich zu sehen ist eine im Ergebnis der Erweiterung der Kriterien feststellbare signifikante Abnahme der potenziell für eine HAW-Endlagerung in Frage kommenden Tonverbreitungsflächen in Norddeutschland.

Erfahrungen aus weltweit durchgeführten Standortsuchverfahren zeigen (siehe Kap. 4), dass bei Zugrundelegung der genannten Auswahlkriterien häufig mehrere Standorte prinzipiell, d. h. aufgrund generischer Modellbetrachtungen und vor Durchführung detaillierter Standorterkundungsarbeiten bzw. des standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweises, für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet sind. Einer Standortbewertung, die lediglich auf übertägigen Erkundungsarbeiten beruht, sind allerdings objektive Grenzen gesetzt. In Anbetracht der enormen Kosten einer untertägigen Standorterkundung (die Erkundung des Standortes Gorleben hat bis Oktober 2000 ca. 1,3 Mrd. Euro gekostet), sollte bei der detaillierten Erkundung von Standortalternativen ein sukzessives Vorgehen entsprechend ihrer Reihung im Ergebnis früherer Phasen des Standortauswahlprozesses erfolgen. Die Reihung der alternativ zu betrachtenden Standorte beruht dabei auf den wahrscheinlichen, sich aus den übertägigen Erkundungsergebnissen ergebenden Eignungsgraden der Standorte. Dafür ist eine Abwägung der Standortauswahlkriterien entsprechend ihrer Bedeutung für die langfristige Endlagersicherheit erforderlich. Erst nach einer Negativbewertung des ersten Standortes sollte die untertägige geologisch-geophysikalische Erkundung des nächstfolgenden Standortes begonnen werden.

Die Auswahlkriterien und die Vorgehensweise bzw. Prinzipien zur Standortevaluation schwanken in den einzelnen Ländern, wie das Beispiel der Schweiz zeigt (Abb. 25)

Zielsetzung	Übergeordnete Prinzipien		
Zielsetzung der geologischen Tiefenlagerung	Passive Sicherheit und Sicherung durch geologische Tiefenlagerung		
Systemorientierte Zielsetzung	Prinzipien bzgl. Standortevaluation	Prinzipien bzgl. Lagerauslegung	
Sicherheit und Robustheit	Mehrfache, passive Sicherheitsbarrieren	Mehrfache, passive Sicherheitsbarrieren	
	Mehrfache Sicherheitsfunktionen, die durch die Elemente des Barrierensystems gewährleistet werden	Mehrfache Sicherheitsfunktionen, die durch die Elemente des Barrierensystems gewährleistet werden	
	Stabilität und Langlebigkeit des Barrierensystems	Stabilität und Langlebigkeit des Barrierensystems	
	Vermeidung von bzw. Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen	Vermeidung von bzw. Unempfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen	
	Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen	Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen	
	Stabilität der geologischen Situation	Rückhaltung und Konzentrationsverminderung	
	Günstige Wirtgesteins-Eigenschaften	Einschluss	
	Explorierbarkeit Charakterisierbarkeit ¹		Redundanz
			Zuverlässigkeit der Implementierung
		Sicherheit während des Betriebs ¹	
Reduzierte Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen eines menschlichen Eindringens		Zuverlässigkeit des Lagerverschlusses	
	Archivierung von Informationen über das Tiefenlager	Archivierung von Informationen über das Tiefenlager	
	Vermeidung von Rohstoffkonflikten	Kompartimentierung und Abfallverfestigung	

Abb. 25: Prinzipien der Standortevaluation im Schweizer Standortauswahlverfahren (NAGRA 2008c)

3.3 Wirtgesteinsabhängige Standortanforderungen - Abwägungskriterien

Aufgrund der Unterschiede in den Eigenschaften und im geologischen Bau der verschiedenen Wirtgesteinsformationen werden in späteren Phasen der Standortsuche neben wirtgesteinsunabhängigen Auswahlkriterien auch gesteinstypspezifische Standortanforderungen berücksichtigt. Die Anwendung der nachfolgend beschriebenen wirtgesteinsabhängigen Abwägungskriterien setzt z. T. sehr detaillierte Kenntnisse voraus, die nicht flächendeckend vorliegen und meist erst im Ergebnis spezieller geologisch-geophysikalischer Erkundungsarbeiten gewonnen werden müssen.

3.3.1 Spezielle Anforderungen an Standorte im Steinsalz

Kriterien für die Auswahl von Salzlagerstätten für die HAW-Endlagerung wurden u. a. von BEST et al. (1982), JARITZ (1983), KRULL (1991), KOCKEL & KRULL (1995) und KRULL et al. (2004) vorgelegt. Aufgrund von deutlichen Unterschieden im geologischen Bau und in den Eigenschaften muss bezüglich der Auswahlkriterien zwischen stratiformen (flach lagernden) Salzformationen und Salzkissen bzw. Salzstöcken, die durch halokinetische Prozesse akkumuliert wurden, unterschieden werden.

In Ländern, die wie Deutschland über beide Typen von Salzlagerstätten verfügen, sind Salzstöcke i.d.R. besser für die HAW-Endlagerung geeignet als flach lagernde Salze. Salzstöcke sind in ihrem Kernbereich meist homogener zusammengesetzt und weisen oft auch größere Steinsalzmächtigkeiten auf. Aufgrund des Abpressens der Wasseranteile beim Salzaufstieg (siehe z. B. BORNEMANN et al. 2008) führen Salzstöcke im Kernbereich meist nur sehr geringe Mengen von Lösungen. Flach lagernde Salzvorkommen bestehen häufig aus Wechsellagerungen halitischer mit tonigen bzw. anhydritischen Schichten. Aufgrund des Fehlens von Aufstiegsprozessen sind sie im Vergleich zu Salzstöcken meist durch geringere Steinsalzmächtigkeiten, höhere Wassergehalte sowie geringere Kriechraten charakterisiert. Flach lagernde Salzgesteine sind infolge des Fehlens von Homogenisierungsprozessen beim Salzaufstieg in ihren Eigenschaften sowie in ihrer Zusammensetzung heterogener und damit schlechter prognostizierbar.

Die Norddeutsche Tiefebene zeichnet sich durch das Vorkommen von ca. 200 Salzstöcken aus. Unter Berücksichtigung der oben genannten Vorteile ist bereits in einer sehr frühen Phase der Standortsuche für ein HAW-Endlager in Deutschland (siehe Kap. 4.5) entschieden worden, das geplante Endlager in einem Salzstock und nicht in einem flach lagernden Salzvorkommen zu errichten. Ausgehend von Langzeitsicherheitsbetrachtungen und endlagerkonzeptionellen Überlegungen muss ein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle geeigneter Salzstock zusätzlich zu den in Kap. 3.1 u. 3.2 genannten Kriterien folgende Anforderungen erfüllen (z. T. KOCKEL & KRULL 1995, KRULL et al. 2004):

- Mindestmächtigkeit der Steinsalzvorkommen von 500 m (300 m Schwebelagerung über dem Einlagerungsbereich, +100 m für die Auffahrung des Bergwerkes, +100 m im Liegenden. Im Erkundungsbergwerk Gorleben ist die Salzschwebelagerung etwa 600 m mächtig, was Einwirkungen auf das Endlager durch eiszeitliche Rinnenbildungsprozesse mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ausschließt.
- Mächtigkeit des über dem Salzstockdach lagernden Deckgebirges mindestens 200 m,

- Mindestfläche im maximal 1000 m tiefen Einlagerungsniveau von 3 km² (AkEnd 2002). Die Mindestnettofläche liegt im Steinsalz in Abhängigkeit von der Abfallmenge und vom Einlagerungskonzept bei ca. 0,5 km² (FILBERT et al. 2004). Werden entsprechende Festen im Flankenbereich von mindestens 200 m sowie ein Aufschlag von wenigstens 20% berücksichtigt, um über Ausweichflächen sowie Sicherheitsabstände bei Einschaltungen von Anhydrit, Kaliflözen u. a. zu verfügen, steigt die Einlagerungsfläche auf ca. 3 km².
- geeigneter Internbau des Salzstocks, d. h. möglichst einfache Antiklinalstruktur und relativ homogene Zusammensetzung (Aufbau und Eigenschaften gut prognostizierbar),
- mächtige Überdeckung durch grundwasserhemmende Sedimente (vor allem Tertiär und Quartär). Die Forderung nach dem Fehlen einer Quartärrinne im Deckgebirge ist nicht umsetzbar, weil für alle Salzstöcke (und Tonvorkommen) Norddeutschlands die Existenz von möglicherweise tief reichenden eiszeitlich gebildeten Rinnenstrukturen für den zu prognostizierenden Zeitraum von 1 Mio. a nicht ausgeschlossen werden kann (KELLER 2009).
- maximale Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich geringer als 50 °C. Aufgrund der geothermischen Tiefenstufe und der regionalen Temperaturverteilung (siehe Abb. 23) wird diese Temperatur in Norddeutschland in einer Tiefe von 1000 – 1200 m erreicht. Damit ist die Maximaltiefe des Einlagerungsbereiches definiert.
- möglichst geringe Aufwärtsbewegung des Salzstocks (JARITZ 1983: ca. 0,01 mm/Jahr), d. h. möglichst geringe Restmächtigkeiten des Salinars in den Randsenken und im Sockel des Salzstocks, also ein möglichst spätes Entwicklungsstadium der Salzstruktur mit geringem Nachfließen aus den Randsenken,
- möglichst schwache Ablaugung bzw. Subrosion am Top des Salzstocks,
- Fehlen tief reichender aktiver Bruchstrukturen im Hangenden und Liegenden des Salzstocks sowie
- Unverritztheit des Salzkörpers, d. h. kein Gewinnungsbergwerk und weitgehendes Fehlen von Erkundungsbohrungen.

Die Erfüllung dieser Anforderungen muss im Verlaufe detaillierter über- und untertägiger geologischer Erkundungsarbeiten überprüft werden.

Es sollte ein möglichst großer Salzstock ausgewählt werden, da klein dimensionierte und annähernd runde Diapire meist einen sehr komplizierten Innenbau und nicht ausreichende Steinsalzmächtigkeiten aufweisen. Die Salzstrukturen sollten sich nicht in Überschiebungs- oder Extrusionsstrukturen sowie im Bereich von Sockelstörungen befinden. Außerdem sollten die Salzlagerstätten nicht durch Basaltgänge durchschlagen werden, um Gasaustritte und Wassereintrübe zu vermeiden. Das Einlagerungsfeld für die HAW-Abfälle darf nicht in den Randbereichen der Diapirstruktur oder (wenn vorhanden) im Salzüberhang angeordnet sein, da diese meist kompliziert aufgebaut sind. Da Kalisalzschichten häufig nahe zum Rand von Salzstöcken positioniert sind, kann diese Anforderung von Bergwerken, die zum Abbau der Kalisalze dienen, oftmals nicht erfüllt werden.

3.3.2 Spezielle Anforderungen an Standorte im Tongestein

Im Ergebnis der Anwendung der in Kap. 3.1 dargestellten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen auf die im Untergrund nachgewiesenen Tonformationen ist es möglich, die für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle potenziell geeigneten tonigen Gesteine regional und teufenmäßig auszuweisen. Ein Beispiel für die sukzessive, kriteriengestützte Vorgehensweise bei der Standortsuche stellt die Auswahl potenziell geeigneter Tonformationen in Deutschland dar (HOTH et al. 2007). Die in der Schweiz und in Frankreich als möglicherweise geeignet eingestufteten Tonformationen basieren auf ähnlichen Auswahlkriterien, die auch im Rahmen einer intensiven Zusammenarbeit ermittelt wurden.

Nach Abschluss der stärker regionalgeologisch orientierten und auf den Ausschlusskriterien bzw. Mindestanforderungen basierenden Sucharbeiten erfolgt eine weitere Reduzierung der Anzahl von Standortalternativen durch die Anwendung zusätzlicher, wirtsgesteinsspezifischer geowissenschaftlicher Auswahlkriterien. Tone/Tonsteine können in Abhängigkeit von ihrer mineralogischen Zusammensetzung sowie ihrer geologischen Geschichte und dem sich daraus ergebenden Deformations- bzw. Metamorphosegrad erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten, d. h. in der Gebirgsstabilität, in der Temperaturempfindlichkeit sowie in der hydraulischen Durchlässigkeit und im Wassergehalt aufweisen (siehe Kap. 2.3). Dies erhöht die Anforderungen an die Standortsuche sowie an die standortbezogene Charakterisierung des Wirtsgesteins. Gleichzeitig führt es dazu, dass im weiteren Verlauf des Standortauswahlprozesses für Tongesteine vor allem Auswahlkriterien berücksichtigt werden müssen, die die gebirgsmechanischen und wärmephysikalischen Eigenschaften betreffen. In Ergänzung zu den wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen gelangen bei der Auswahl von Endlagerstandorten in Tonformationen demnach folgende Kriterien zur Anwendung:

- Einlagerung der Abfälle nicht tiefer als 600 – 800 m uGOK zur Vermeidung ungünstiger gebirgsmechanischer Verhältnisse (siehe weiter unten),
- günstige geomechanische Eigenschaften der Gesteine (kein zu hoher Metamorphosegrad, keine intensive Klüftung, geringer Spannungs-/ Deformationszustand). Tonschiefer weisen aufgrund des Vorhandenseins von Schieferungs- und Klufflächen häufig unzulässig hohe Durchlässigkeitsbeiwerte von $> 10^{-10}$ m/s auf.
- Mindesttiefe der Tonformation. Die von HOTH et al. (2007) geforderte Mindesttiefe von 300 m ist aufgrund der bereits beim Salz (Kap. 3.3.1) beschriebenen Gefahr von eiszeitlichen Rinnenbildungen nicht ausreichend. Es sollten in Analogie zum Steinsalz mindestens 500 m sein. Günstig ist eine Überdeckung der Tonschichten durch z. B. gering durchlässige Kalksedimente (keine Mergel), die sie vor erosiven Prozessen schützen.
- Mindestfläche zur Einlagerung der Abfälle von ca. 10 km² (JOBMANN et al. 2007), wahrscheinlich ist aber deutlich mehr Fläche erforderlich, wenn ähnlich wie beim Steinsalz Ausweichflächen und Sicherheitsabstände berücksichtigt werden,
- keine stark geneigten bzw. steil einfallenden, intensiv gefalteten oder tektonisch gestörten tonigen Schichten,
- möglichst geringe Gehalte von organischen Substanzen und Wasser zur Vermeidung von Wechselwirkungen mit den Abfallcontainern und von Gasbildungsprozessen bei der Einlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen,
- keine Gebiete mit stark veränderlicher mineralogisch-geochemischer und lithofazieller Zusammensetzung der tonigen Wirtsgesteine,
- bei tiefer liegenden Tonformationen infolge ihres Spröbruchverhaltens (Gefahr von Kluffbildungen) keine Gebiete in der Nähe von Störungszonen sowie
- keine Gebiete mit erhöhten geothermischen Gradienten (Verringerung der für die Einlagerung der Wärme entwickelnden Abfälle zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenz).

Bereits 1977 haben KOCKEL & ROLAND in einer Studie über die möglichen Endlagerwirtsgesteinsformationen in Deutschland eine Endlagertiefe von maximal 1000 m in Tongesteinen vorgeschlagen. Diese Aussage bezüglich der maximalen Tiefenlage von Endlagern in Tongesteinen wurde 1979 als Empfehlung in eine Studie für die damaligen EU-Mitgliedsstaaten aufgenommen und ist heute weltweit anerkannt. Im französischen

Konzept in Jura-Tonsteinen wird von einer Einlagerungstiefe zwischen 200 m und 1000 m ausgegangen (ANDRA 2001) und von der IAEA wird als generelle Richtlinie eine Tiefe von „mehreren hundert Metern“ angegeben (IAEA 2003). JOBMANN et al. (2006) haben im Ergebnis von Berechnungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines HAW-Endlagers in Tonstein aus thermischer und mechanischer Sicht eine möglichst geringe Einlagerungstiefe empfohlen. Im schweizerischen Endlagerkonzept für den Opalinuston wird eine Maximaltiefe von ca. 900 m genannt (NAGRA 2002a).

Tonige Gesteine können in größerer Tiefe aufgrund von Gebirgsspannungen oder Verschieferungen schwierige felsmechanische Verhältnisse aufweisen, die z. B. zu Instabilitäten von Hohlräumen führen können. Beeinträchtigungen in der Langzeitsicherheit von Endlagern können unter diesen Voraussetzungen nur mit, an die Besonderheiten des Standortes angepassten, z. T. extrem kostenintensiven Ausbaueinrichtungen verhindert oder gemindert werden. Zementgebundene Felssicherungsmaßnahmen werden allerdings u. a. wegen der langzeitsicherheitlichen Relevanz der Ausbaumaterialien (Beeinflussung der natürlichen geochemischen Verhältnisse) nicht empfohlen (NAGRA 2002a und e). Außerdem ist zu beachten, dass zunehmende Einlagerungstiefen i.d.R. einen erhöhten Diagenese- bzw. Metamorphosegrad der Gesteine zur Folge haben. Dies hat zur Konsequenz, dass diese tonigen Gesteine weniger plastisch und stärker geklüftet sind sowie über ein geringeres Radionuklidsorptionsvermögen verfügen (siehe Kap. 2.3). Werden allerdings zu flach lagernde, plastisch reagierende Tonformationen als Endlagerwirtsgestein ausgewählt, so ist möglicherweise der Sicherheitsabstand zur Biosphäre zu gering. Außerdem sind aufgrund der i.d.R. plastischen Eigenschaften flach lagernder Tonformationen sehr hohe Aufwendungen bei der Auffahrung und bei der Gewährleistung der Hohlraumstabilität während des Betriebes des Endlagers erforderlich. Vor dem Hintergrund der ungünstigen Materialeigenschaften unverfestigter Tone wurden für Deutschland die meist plastisch reagierenden und zu geringmächtigen tertiären Tongesteinsformationen (entsprechen dem Boom Clay in Belgien) nicht weiter für die Endlagerung betrachtet.

Bei der Festlegung der Maximaltiefe eines Endlagerbergwerkes in tonigen Wirtsgesteinen ist neben bergbautechnischen und felsmechanischen Aspekten vor allem die Temperatur im Einlagerungsbereich ein wichtiges Entscheidungskriterium. Tonige Gesteine weisen deutlich schlechtere Wärmeleitfähigkeiten als Steinsalz auf, was einen schlechteren Wärmeabtransport aus dem Endlagerbergwerk in das Umfeld zur Folge hat. Deshalb muss für die temperaturempfindlichen tonigen Gesteine (siehe Kap. 2.3) eine möglichst geringe Gebirgstemperatur (niedriger geothermischer Tiefengradient) im Einlagerungsniveau vorliegen. Als Maximalwert für die Gebirgstemperatur sollten 50° C nicht überschritten werden. Eine höhere Umgebungstemperatur reduziert den für die Wärmeabgabe durch die Abfälle bis zur Schädigung der Tonbarriere (bei 90 - 95 °C, siehe Kap. 3.2) zur Verfügung stehenden Temperaturbereich. Unter Zugrundelegung eines normalen geothermischen

Gradienten liegen die Temperaturen der in Deutschland, der Schweiz und in Frankreich in Frage kommenden Gebiete in 1000 m Tiefe im Mittel bereits zwischen 40° C und 50° C.

In Endlagerkonzepten für tonige Wirtsgesteine muss, um die für die Abfalleinlagerung nutzbare Temperaturspanne nicht zu überschreiten, im Vergleich zum Steinsalz der Abstand zwischen den Abfallbehältern erhöht werden, was die Fläche und damit die Kosten des Endlagers deutlich erhöht (ausführlicher siehe Kap. 2.5). Im Unterschied zum Steinsalz, das aufgrund seines Kriechvermögens thermomechanische Spannungen schnell abbaut, sind die Spannungsverteilungen in tonigen Gesteinen häufig komplizierter. Dies macht aufwändigere Standorterkundungsarbeiten erforderlich (HAMMER et al. 2009). Problematisch kann auch sein, dass Tonsteine über ein ausgeprägtes „Langzeitgedächtnis“ für Spannungsänderungen bzw. für Lageänderungen der Spannungsvektoren in ihrer geologischen Geschichte (z. B. infolge Inlandvereisung bzw. Eisauflast) verfügen. Dies kann dazu führen, dass bei Einschluss einer Wärmequelle oder bei Anlegen einer äußeren Spannung Differenzspannungen in den Tonsteinen entstehen, die z. T. auch auf Spannungsverteilungen aus der früheren Entwicklungsgeschichte der Tonsteine basieren können.

Da die gesteinsmechanischen Eigenschaften als wesentlicher Faktor in die Langzeitsicherheitsbetrachtungen zur HAW-Endlagerung eingehen, wies der AkEND (2002) bei der Formulierung der Abwägungskriterien für mögliche Endlagerregionen auf die Bedeutung des gebirgsmechanischen Langzeitverhaltens der Wirtsgesteine hin. Während in Deutschland im Ergebnis intensiver Bergbau- und Forschungstätigkeiten ein hoher Kenntnisstand zur stofflich-strukturellen Zusammensetzung und zur Gebirgsmechanik von Salzgesteinen existiert, ist dieser für Tongesteine, die nur selten Gegenstand bergbaulicher Aktivitäten sind, wesentlich geringer. Zudem muss für tonige Gesteine von beträchtlichen standortspezifischen Unterschieden ausgegangen werden.

Für die im Rahmen langzeitsicherheitlicher Bewertungen erforderliche umfassende Charakterisierung von tonigen Endlagerwirtsgesteinen sind deshalb noch umfangreiche Laboruntersuchungen und In-situ-Studien erforderlich. Außerdem gilt es, die Daten und Erfahrungen aus dem Tunnelbau sowie mit Dichtkörpern auf Tonbasis, die zum Verschluss von Bergwerken oder Untertagespeichern entwickelt wurden, zu nutzen. In Laborversuchen und In-situ-Versuchen wird das Kurz- und Langzeitmaterialverhalten von Tonen untersucht (LUX 2002, BGR 2007, BOSSART et al. 2008, ANDRA 2005c). Die Extrapolation der Analyseergebnisse auf lange Zeiträume ist unter Berücksichtigung zusätzlicher thermischer Einflüsse aus der Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle äußerst schwierig.

3.3.3 Spezielle Anforderungen an Standorte in Kristallingesteinen

Zum heutigen Zeitpunkt existieren zahlreiche detaillierte Abhandlungen zu den Anforderungen an HAW-Endlagerstandorte in kristallinen Gesteinen (z. B. BRÄUER et al. 1994, NAGRA 2005, ANDRA 2005a, SKB 1998,1995, McEWEN & ÄIKÄS 2000). Zusätzlich zu den in Kap. 3.1 genannten wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen werden für die Standortauswahl in magmatischen Wirtsgesteinen weitere geowissenschaftliche Auswahlkriterien genutzt. Neben struktureologisch-tektonischen Kriterien haben vor allem hydrogeologische, petrophysikalische und mineralogisch-geochemische Standortanforderungen für kristalline Wirtsgesteine einen hohen Stellenwert. Die wichtigsten Auswahlkriterien sind:

- Langfristige geodynamische bzw. tektonische Stabilität. Im günstigsten Fall soll das Gebiet Bestandteil einer alten, präkambrischen Plattform bzw. eines alten Schildes sein, mit geringen Auswirkungen der variszischen und alpidischen Orogenesen. Im Endlagergebiet dürfen keine Anzeichen für neotektonische Aktivitäten vorhanden sein.
- Geringe tektonische Überprägung und Klüftigkeit der Magmatite bis in die geplanten Einlagerungstiefen.
- Einfache und im Verlaufe der bisherigen geologischen Entwicklung stabile Spannungsverteilung. Der Auswahl des Endlagerstandortes muss eine detaillierte Analyse der geodynamischen Entwicklung der Region und der zeitlich-räumlichen Evolution der im Wirtsgestein vorherrschenden Spannungsregime zugrunde liegen. In deren Ergebnis werden potenziell geeignete stabile Krustenabschnitte ausgegliedert, in denen die Folgen möglicher tektonischer Beanspruchungen, wie z. B. Reaktivierung bzw. Neubildung von Störungszonen oder Zunahme der Öffnungsweiten von Klüften bestimmter Orientierung, am geringsten sind.
- Ausschluss von Kontaktbereichen unterschiedlicher Gesteinstypen und von Rand- oder Dachbereichen magmatischer Intrusionen.
- Einlagerungstiefe zwischen ca. 500 m und 1200 m.
- Schwach gegliedertes Oberflächenrelief, was i.d.R. niedrige hydraulische Gradienten zur Folge hat. Nach Möglichkeit sollte sich der Standort einer abzuteufenden Schachanlage im Bereich einer oberflächigen Wasserscheide befinden und durch große Entfernungen zum Vorfluter charakterisiert sein.
- Niedrige Grundwasserneubildungsraten und ein tief gelegener Grundwasserspiegel, idealerweise unterhalb des Endlager-Bergwerkes.

- Gering mineralisierte, reduzierende, +/- neutrale bis schwach basische Grundwässer im geplanten Einlagerungsniveau sowie
- minimale Anisotropie der physikalischen Eigenschaften und der Zusammensetzung der Gesteine.

Für die Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in kristallinen Gesteinen stellt das genetisch bedingte Vorkommen von Absonderungs- bzw. Abkühlungsklüften, die in größeren Tiefen infolge des petrostatischen Druckes weitgehend geschlossen sind, i.d.R. kein langzeitsicherheitliches Problem dar. Dies setzt allerdings voraus, dass sie durch nachfolgende Deformationsprozesse nicht wieder geöffnet werden. Ziel der geologisch-geophysikalischen Erkundung muss es sein, solche Gesteinsmassive auszugliedern, in denen mächtige, hydrodynamisch aktive Störungszonen fehlen. Zwischen eventuell vorkommenden, hydraulisch aktiven Störungszonen müssen unter Beachtung von Sicherheitsabständen möglichst homogene und minimal deformierte Gesteinsblöcke geringer Durchlässigkeit ausgewiesen werden, deren Ausmaße das sich aus dem Endlagerkonzept ergebende Minimalvolumen deutlich überschreiten.

Kontaktbereiche von Intrusivkörpern sind aufgrund ihres häufig zu beobachtenden Einschlussreichtums, intensiverer Klüftigkeit und erhöhter Gebirgsspannungen meist schlechter zur HAW-Endlagerung geeignet als der Zentralteil von Intrusivkörpern. Die Kontaktbereiche von Magmatiten sind häufig durch das Vorkommen hybrider, inhomogener Gesteine und intensive Gangdurchschwärmung charakterisiert. Dies bestätigen z. B. die im Rahmen der Standortsuche für ein HAW-Endlager im Umfeld von Schelesnogorsk, bei Krasnojarsk (südliches Zentralsibirien) vorgenommenen Untersuchungen des Belogorsker Granitoidmassivs. Im Ergebnis gravimetrischer und aeromagnetischer Analysen sowie geologischer Kartierungsarbeiten im Maßstab 1 : 50 000 wurden besonders im Randbereich des Intrusivkörpers Spuren intensiver Deformationen und ein hoher Inhomogenitätsgrad festgestellt. Lediglich im Zentralteil des Massivs konnte ein etwa 16 km² großes, annähernd homogen zusammengesetztes, für die HAW-Endlagerung potenziell geeignetes Gebiet ausgegliedert werden (ANDERSON et al. 1993, 1996).

Günstig für einen Endlagerstandort im Kristallin, ebenso wie in Tonstein und Steinsalz ist es, wenn ein mehrere Hundert Meter mächtiges sedimentäres Deckgebirge das Endlagerbergwerk schützt. Mächtige, möglichst Tonmineral-reiche Deckschichten verhindern bzw. behindern den Zutritt oxidierender Grundwässer in das Endlager und schützen die Abfälle vor Oberflächeneinflüssen, wie z. B. Vergletscherung, Rinnenbildung und tief reichende Erosion. Besonders günstige hydrogeologische Rahmenbedingungen liegen vor, wenn wie beim Endlager Konrad das Endlagerbergwerk durch eine wasserundurchlässige, tonreiche Sedimentschicht vor dem Zutritt von O₂-reichen Grundwässern geschützt wird. Die sedimentäre Überdeckung erschwert allerdings die geologisch-geophysikalische Explorierbarkeit des Kristallins von der Oberfläche aus.

Die Gesteine der geologischen Barriere sollten im Nah- und Fernfeld des Endlagers über gut ausgebildete Radionuklid-Rückhalteeigenschaften verfügen. Für kristalline Wirtsgesteine zählen dazu vor allem:

- ein gutes Sorptionsvermögen der Gesteine, unterstützt durch sekundäre, im Ergebnis von Alterationsprozessen gebildete Tonminerale, d. h. hohe Gehalte an Mineralphasen mit großen reaktiven Oberflächen,
- geringe Diffusionskoeffizienten, ergänzt durch geringe effektive Porositäten und niedrige Matrixdurchlässigkeiten,
- ein „Verheilen“ von ursprünglich offenen Klüften in den Gesteinen durch hydrothermal-metasomatische Alterationsprodukte, d.h. ein weitgehendes Fehlen von hydraulisch aktiven Störungszonen.

Der Einlagerungsbereich sollte durch stabile hydraulische und hydrochemische Bedingungen gekennzeichnet sein, die weitgehend unabhängig von den klimatischen Verhältnissen an der Erdoberfläche existieren. Ausgehend von einer erhöhten Radionuklid-Löslichkeit in oxydierenden Wässern, sollten die in Granitoiden meist gering mineralisierten, ± neutralen bis schwach basischen Grundwässer im geplanten Einlagerungsniveau über negative Redoxpotenziale verfügen (KRAUSKOPF 1986, 1988). Die Mehrheit der Grundwässer in magmatischen Gesteinen erfüllt ab einer Tiefe von ca. 200 bis 250 m diese Bedingungen. Möglichst geringe Gehalte von Kolloiden bzw. Komplexbildnern in den Grundwässern behindern den Radionuklidtransport ebenso, wie geringe Karbonatkonzentrationen in den Lösungen. Im Falle erhöhter CO_3^{2-} -Gehalte im Grundwasser kommt es zu einer deutlichen Abnahme freier Bindungskapazitäten in den gesteinsbildenden und sekundären Mineralen der Granitoide, d. h. zu einer geringeren Radionuklidsorption.

Für die Verbesserung der Barriereigenschaften magmatischer Gesteine ist es günstig, wenn im Einlagerungsniveau Sekundärminerale mit hohem Sorptionsvermögen beobachtet werden. Das Schadstoffrückhaltevermögen von kristallinen Gesteinen verbessert sich durch die Bildung von sekundären Tonmineralen aus den gesteinsbildenden Feldspäten und Glimmern. Stark verwitterte oder metasomatisch überprägte Gesteinsbereiche stellen oft effektiv wirkende geochemische und Sorptionsbarrieren für migrierende Radionuklide dar (PETROV 2001). Das an derartige metasomatische Veränderungen der Gesteine gebundene Verheilen von Klüften führt zu einer Senkung der Gebirgsdurchlässigkeiten. Allerdings dürfen diese Alterationsprodukte auf keine, in jüngster Vergangenheit abgelaufenen geologischen Prozesse zurückzuführen sein, denn dies würde für ein offenes hydrogeologisches System mit möglicherweise eingeschränkter Langzeitsicherheit sprechen.

Nach LAVEROV et al. (2001) lassen Klüfte mit Öffnungsweiten $< 0,01$ mm eine freie Bewegung von wässrigen Lösungen nicht mehr zu. Der Transport von Radionukliden über Diffusionsprozesse ist in magmatischen Gesteinen sehr gering und beträgt nach SMELL & ROSBOLT (1984) maximal 20 cm in 0,5 Millionen Jahren. Entsprechend den AkEnd-Empfehlungen (AkEND 2002) sollten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich effektive Diffusionskoeffizienten von $< 10^{-11}$ m²/s und Verteilungskoeffizienten (k_d -Werte) für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide von $\leq 0,001$ m³/kg vorliegen.

4 Beispiele für Standortauswahlverfahren

4.1 *Finnland*

Das finnische Konzept zur Endlagerung radioaktiver Abfälle geht unter Zugrundelegung der nationalen geologischen Gegebenheiten von einem HAW-Endlager im kristallinen Grundgebirge aus. Wie für das gesamte Baltische Schild charakteristisch, zeigt die geologische Karte Finnlands (Abb. 26) die Dominanz von sehr alten (deutlich älter als 1 Mrd. a) hochmetamorphen bzw. magmatischen Gesteinen. Die in Mittel- und Westeuropa infolge ausgedehnter und lang anhaltender Beckenentwicklungen im Deckgebirge alter kristalliner Schilde relativ weit verbreiteten Salz- und Tonsteinvorkommen (siehe z. B. Abb. 33) fehlen aufgrund ausgeprägter Hebungstendenzen im Baltikum. Deshalb sind Endlagerprojekte in tonigen Wirtsgesteinen oder in Steinsalz in dieser Region nicht möglich (siehe auch Kap. 4.2).

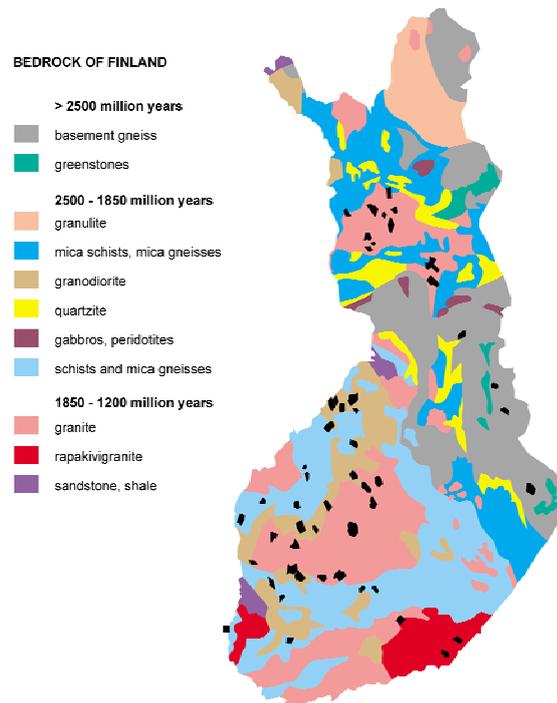


Abb. 26: Schematisierte geologische Karte Finnlands, auf der sehr alte magmatische und metamorphe Gesteinskomplexe dominieren. Schwarz hervorgehoben sind die im Verlaufe des finnischen Standortauswahlverfahrens näher betrachteten Regionen (McEWEN & ÄIKÄS 2000, siehe auch Abb. 28)

Finnland beschäftigt sich seit 1977 mit wissenschaftlichen Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Von 1980 bis 1982 erfolgte eine generelle Bewertung der Endlagerungsoptionen im finnischen Grundgebirge. Der daran anschließende finnische Standortauswahlprozess für ein Endlager für ausgediente Brennelemente kann in drei Etappen eingeteilt werden:

- 1983 bis 1986: Standortidentifizierung (site identification surveys) mit der Auswahl von Standortregionen für vorläufige Untersuchungen,
- 1986 bis 1992: vorläufige Standortuntersuchungen in einer Reihe von potenziell geeigneten Gebieten und
- 1993 bis 2000: ergänzende Untersuchungen einer geringen Anzahl von Standorten mit dem Ziel der Auswahl eines detaillierter zu bewertenden, potenziell geeigneten Standortes.

Einen Überblick zum Ablauf sowie zu den, in den einzelnen Phasen des Standort-suchprozesses angewendeten Auswahlkriterien vermittelt Abb. 27.

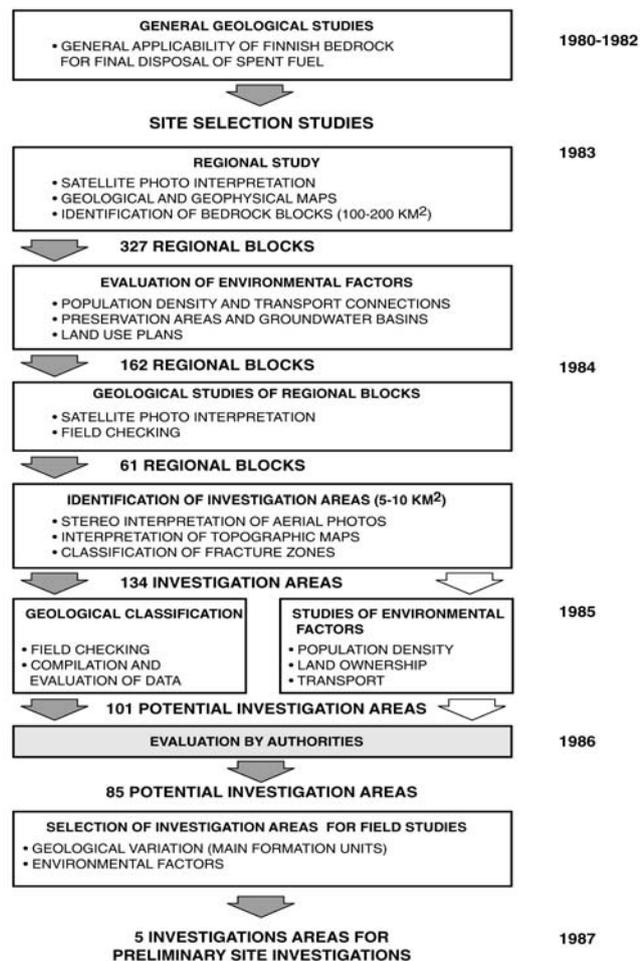


Abb. 27: Überblick zum Ablauf des finnischen Standortsuchverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (McEWEN & ÄIKÄS 2000)

Nach dem Regierungsbeschluss zur Errichtung eines Endlagers in kristallinen Gesteinen in mehreren hundert Meter Tiefe im Jahr 1983 erfolgte durch Teollisuuden Voima Oy (TVO, später ersetzt durch die im Besitz der EVU's Fortum und TVO befindliche finnische Endlagerorganisation Posiva Oy) im Zeitraum von 1983 bis 1986 ein „Areal Screening“ (Übersichtsstudie). Im Ergebnis der ersten Phase wurden 327 mögliche Standortregionen mit einer Fläche von je 100 bis 200 km² ausgewiesen (Abb. 28). In dieser frühen Phase des Standortsuchprozesses wurden potenziell geeignete Gebiete vor allem auf der Grundlage bereits vorliegender struktur- und hydrogeologischer Informationen ausgewiesen, basierend z. B. auf Angaben zur Verteilung und zu den hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen sowie zur Klüftigkeit der Gesteine. Die Lokalisierung mächtiger Störungszonen im kristallinen Basement erfolgte auf der Grundlage von Satellitenaufnahmen (Landsat 1) sowie aeromagnetischer und gravimetrischer Daten (siehe HAMMER et al. 2009). Neben der Ausgliederung von hydraulisch aktiven Störungszonen spielten aufgrund der geographischen und geologischen Besonderheiten

Finnlands in dieser Phase des Auswahlprozesses andere, von der IAEA empfohlene Auswahlkriterien (IAEA 1977), wie z. B. Topographie, seismische Aktivitäten oder Intensität von Erosionsprozessen, nur eine untergeordnete Rolle.

Anschließend wurden die ausgewählten Blöcke zwischen den nachgewiesenen Störungzonen unter Nutzung von Luftbildaufnahmen, Ergebnissen regionaler geophysikalischer Studien und großmaßstabiger geologischer Karten detaillierter bewertet. Diese Arbeiten waren gepaart mit Grundlagenforschung zur Endlagerung in granitoiden Gesteinen und zur Sicherheitsnachweisführung für ein solches Objekt.

Bei der weiteren Reduzierung der in Frage kommenden potenziell geeigneten Standortregionen kamen vor allem solche Faktoren, wie die Bevölkerungsdichte, die Abgeschlossenheit bzw. die Transportmöglichkeiten, die Grundwasser- und Landschaftsnutzung sowie die Bodenbesitzverhältnisse zur Anwendung. Dies führte zu einer schrittweisen Reduzierung der möglichen Standortregionen von 327 auf 61 „regionale Blöcke“, in denen dann 134 bzw. 101 potenziell geeignete Untersuchungsgebiete mit einer Fläche von je ca. 10 km² abgegrenzt wurden (Abb. 28).

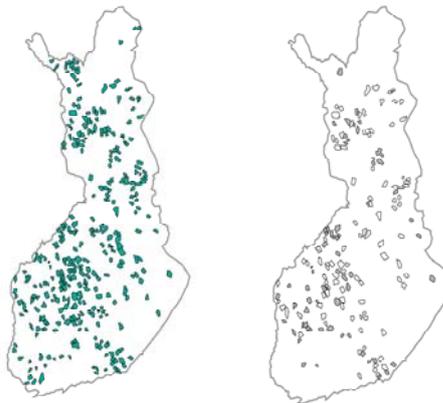


Abb. 28: Verteilung der im Ergebnis von Übersichtsstudien schrittweise reduzierten potenziell geeigneten Endlagerstandortregionen (links –327 regionale Blöcke, rechts – 134 mögliche Endlagergebiete) in Finnland (McEWEN & ÄIKÄS 2000)

Nach der positiven Sicherheitsbewertung der Endlagerungsoption im ungeklüfteten kristallinen Fundament Finnlands (TVO 1985) spielten im Verlaufe der weiteren Minimierung der Anzahl der möglichen Standortregionen insbesondere die Bodenbesitzverhältnisse, die Möglichkeiten zum Transport der Abfallbehälter und die öffentliche Akzeptanz des Endlagers in den betroffenen Regionen die entscheidende Rolle (Abb. 27). Die gesamte abschließende Phase des Auswahlprozesses wurde vom finnischen Umweltministerium und vom Finish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) begleitet.



Abb. 29: Lage der fünf detailliert untersuchten Standorte für den Bau eines Endlagers für abgebrannte bzw. ausgediente Brennelemente in Finnland (McEWEN & ÄIKÄS 2000)

Nach intensiven Diskussionen unter Einbeziehung der betroffenen Gemeinden wurden 1987, trotz der Ereignisse in Tschernobyl, fünf potenziell geeignete Gebiete für weitergehende Untersuchungen festgelegt (Abb. 29). An den Standorten Olkiluoto in Eurajoki, Romuvaara in Kuhmo, Veitsivaara in Hyrynsalmi, Syyry in Sievi und Kivetty in Konginkangas (Äänekoski) wurden von 1987 bis 1992 geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten mit Tiefbohrungen von bis zu 1000 m Tiefe sowie Machbarkeitsstudien durchgeführt. Bei der Festlegung der Standorte sind bewusst unterschiedliche geologische Einheiten bzw. verschiedene granitoide Gesteinstypen ausgewählt worden, um den Einfluss variierender Gesteinseigenschaften auf die Endlagersicherheit bewerten zu können. Während in Romuvaara und Veitsivaara die ältesten, archaischen Gesteine Finnlands vorkommen (Basement-Gneise bzw. Rote Granite/Gneis-Gänge), wurden in Syyry homogene Tonalite, in Kivetty porphyritische Granodiorite und in Olkiluoto ein Komplex von Migmatiten, Gneisen, Graniten und Tonaliten untersucht.

Der relativ frühe Ausschluss von basischen Gesteinsvorkommen bei der Suche nach einem Endlagerstandort wurde Anfang der 1990er Jahre, d. h. im Verlaufe späterer Phasen des Auswahlverfahrens kritisch hinterfragt. Die vom Finnischen Geologischen Dienst in den 1980er Jahren angeführten Gründe für den Ausschluss von basischen Gesteinen, wie z. B. die häufige Assoziation mit Minerallagerstätten sowie die Dominanz von meist kleinen und inhomogen zusammengesetzten Gesteinsvorkommen, wurden später von TVO und Posiva Oy in speziellen Studien bekräftigt (TVO 1993, POSIVA 1996).

Parallel zu den Arbeiten für die Auswahl eines Endlagerstandortes für abgebrannte Brennelemente erfolgten ab 1988 am Standort Olkiluoto (ca. 210 km NW Helsinki) in einer Entfernung von etwa 1 km zum KKW und in 70 bis 100 m Tiefe die Eignungsprüfung und ab 1992 der Bau eines Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Tonaliten/ Quarzdioriten. Außerdem baute man ab 1993 am Standort Loviisa (ebenfalls KKW-Standort, ca. 100 km NE Helsinki) etwa 110 m unterhalb der Erdoberfläche in grobkörnigen porphyrischen Rapakivi-Graniten ein weiteres Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle, dessen Genehmigung und Inbetriebnahme 1998/1999 erfolgten.

Die Ergebnisse der Standortuntersuchungen und vorläufiger Sicherheitsbewertungen (Machbarkeitsstudien) ergaben, dass alle fünf Standortregionen für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente potenziell geeignet sind. Aufgrund sehr komplexer geologischer Verhältnisse und der dadurch zu erwartenden Schwierigkeiten bei der geologischen Erkundung wurden die Standorte Syyry und Veitsivaara 1992 aus dem weiteren Suchverfahren ausgeschlossen (TVO 1993).

1993 bis 1999 erfolgten vertiefende geologisch-geophysikalische Untersuchungen an den drei verbliebenen Standorten Romuvaara, Kivetty und Olkiluoto. Da 1994 Russland beschloss, die abgebrannten Brennstäbe aus den russischen Druckwasserreaktoren des KKW Loviisa nicht mehr zurückzunehmen und aufzuarbeiten, war es notwendig, zusätzlich nach einer Endlagermöglichkeit für diese Abfälle in Finnland zu suchen, möglichst in der Nähe des KKW Loviisa. Positiv bewertete Ergebnisse von Vorerkundungen am Standort Loviisa (Hästholmen) führten dazu, dass im Zeitraum von 1997 bis 1999 an vier Standorten detaillierte geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten durchgeführt wurden. Die Standorte wurden jeweils durch 10 bis 12 Tiefbohrungen untersucht, die anschließend für geomechanische und hydrogeologische Messungen instrumentiert wurden (ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009).

Eine vorläufige Bewertung der Langzeitsicherheit und der betrieblichen Sicherheit der geplanten Endlager sowie speziell angefertigte Umweltverträglichkeitsstudien (Assessment of environmental impacts) ergaben für alle vier Standorte ein positives Ergebnis (VIENO & NORDMAN 1999). Die sozial-ökonomischen Auswirkungen wurden für alle Standorte gleich bewertet. Allerdings war die Akzeptanz in den Gemeinden mit bereits bestehenden nuklearen Einrichtungen (Eurajoki - Olkiluoto und Loviisa - Hästholmen) höher als in den Gemeinden Kuhmo (Romuvaara) und Aänekoski (Kivetty). Auf der Grundlage einer komplexen Bewertung der vorliegenden Standortdaten wurde unter besonderer Berücksichtigung von soziologischen Gesichtspunkten Eurajoki (Olkiluoto, Abb. 30) am günstigsten bewertet.



Abb. 30: Geographische Lage des wahrscheinlichen finnischen Endlagerstandortes für abgebrannte Brennelemente Olkiluoto (Quelle POSIVA)

An diesem Standort war die Infrastruktur am besten entwickelt. Außerdem werden durch den Endlagerbau am Standort Olkiluoto die für ganz Finnland erforderlichen Abfalltransporte minimiert, da sich der größte Teil der Abfälle vor Ort am Kernkraftwerk ansammeln wird. Der Standort ist allerdings in strukturenologischer Hinsicht kompliziert aufgebaut. Neben schwach deformierten Feldspat-Gneisen kommen auch stark deformierte migmatitische Gneise vor und mächtige subhorizontal verlaufende Störungszonen erschweren den Endlagerbau und den Langzeitsicherheitsnachweis (VIRA 2008). Die Wirtsgesteine sind durch eine deutliche Anisotropie in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften charakterisiert.

1999 schlug Posiva Oy aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und vergleichender Bewertungen Olkiluoto als möglichen Endlagerstandort vor. Sowohl der Gemeinderat von Eurajoki (20 zu 7 Stimmen) als auch die lokal ansässige Bevölkerung (60 % Zustimmung) stimmten dem Endlagerbau zu. Im Dezember 2000, nach Vorlage einer positiven Stellungnahme durch die Genehmigungsbehörde STUK, bestätigte das finnische Parlament die Benennung von Olkiluoto als Standort für die Errichtung einer „Underground rock characterisation facility“ und, im Falle der Bestätigung der Eignung, als Endlagerstandort. Im Mai 2001 ratifizierte das Parlament mit überwältigender Mehrheit (159 zu 3 Stimmen), d. h. selbst unter Einschluss der grünen Abgeordneten, die Regierungsentscheidung („Decision-in-principle“ – DiP).

Seit 2004 erfolgt am Standort Olkiluoto die Auffahrung des URL's bzw. Erkundungsbergwerkes ONKALO (Abb. 31), das nach vorläufigen Planungen aus einer etwa 5,5 km langen Rampe, einem ca. 520 m tiefen Ventilationsschacht und zwei Sohlen (420 m - Untersuchungssohle und 520 m – mögliche Einlagerungssohle) besteht. Die Vortriebsarbeiten und die

Installation der notwendigen Technik sollen bis Ende 2010 abgeschlossen sein. Beim Vortrieb der bergmännischen Auffahrungen wurden in den Teufenbereichen 70 bis 130 m sowie 290 bis 330 m mächtige Störungszonen mit starken Wasserzutritten (bis 600000 l/a) festgestellt, die bei den Planungen zur Auslegung des Endlagerbergwerkes und beim Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt werden müssen.

Mit den ONKALO-Erkundungsergebnissen (POSIVA 2009) sollen eine abschließende Eignungsbewertung des Standortes und die Auswahl des konkreten Einlagerungsfeldes erfolgen. Außerdem bilden die Daten aus der detaillierten Charakterisierung der Gesteine die Grundlage für die Entwicklung des Endlagerdesigns bzw. -konzeptes und für die abschließende Langzeitsicherheitsbewertung des Standortes. Die Durchführung der untertägigen Standortcharakterisierung soll 2012 abgeschlossen werden. Im selben Jahr soll, unter der Voraussetzung der Eignung des Standortes, der Antrag auf den Bau des Endlagers bei der Genehmigungsbehörde gestellt werden. Für 2020 ist nach derzeitigen Schätzungen die Inbetriebnahme des Endlagers geplant.

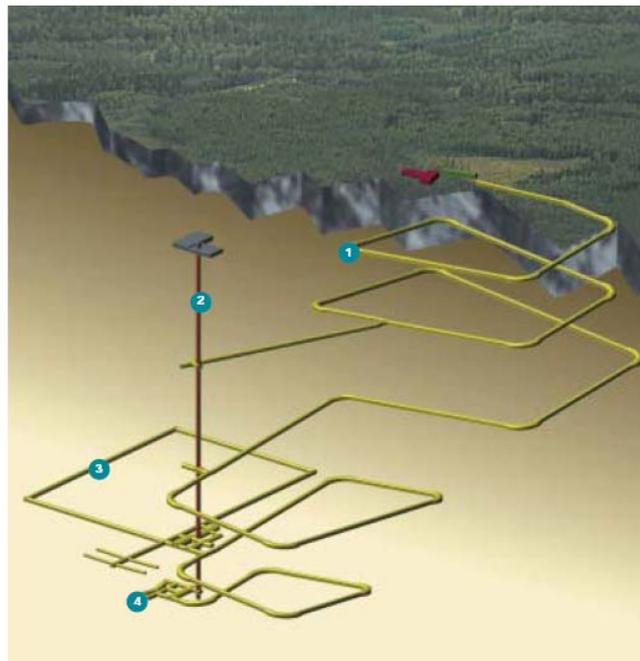


Abb. 31: Schematische Darstellung des Forschungs- und Erkundungsbergwerkes ONKALO am Standort Olkiluoto, das bei Nachweis seiner Eignung als Endlagerbergwerk ausgebaut werden soll (1 = Zugangsstrecke (Rampe), 2 = Ventilationsschacht, 3+4 = Untersuchungssohlen) (Quelle POSIVA)

4.2 Schweden

Ebenso wie in Finnland werden aufgrund der geologischen Gegebenheiten auch in Schweden nur die Gesteine des kristallinen Grundgebirges als Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. In Analogie zu Finnland gibt es auch in Schweden aufgrund der lang anhaltenden Hebungsbewegungen des Baltischen Schildes keine für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente oder hochradioaktiver Abfälle geeigneten Steinsalz- oder Tonsteinvorkommen (Abb. 32).

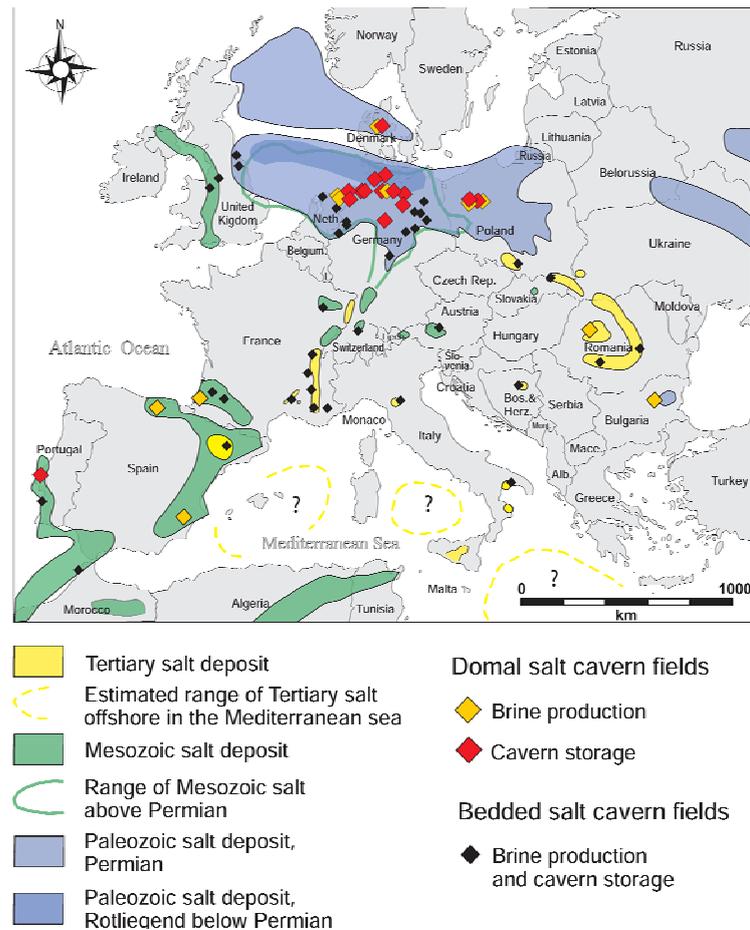


Abb. 32: Verteilung der Salzlagerstätten in Europa (KBB 2007). Deutlich zu sehen ist das Fehlen von Salzvorkommen in Skandinavien.

Bereits Mitte der 1970er Jahre begann Schweden mit ersten Arbeiten zur Standortauswahl für ein Endlager für radioaktive Abfälle. Die dafür erforderlichen Untersuchungen werden durch die Endlagergesellschaft Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) durchgeführt, die sich mehrheitlich im Besitz der EVU's Vattenfall und Sydkraft befindet. Nach der bereits sehr früh getroffenen grundsätzlichen Entscheidung für ein granitoides Wirtsgestein lag zu Beginn der Untersuchungen der Schwerpunkt auf Forschungsarbeiten zum Endlagerkonzept im Kristallin. Vor allem für die Entwicklung der Einlagerungstechnik, die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kanister und back-fill-Material sowie

zum Studium von Störungszonen und der Grundwasserfließverhältnisse im geklüfteten Kristallin nutzte SKB ab 1976 bis 1992 ein ausgeerztes Eisenbergwerk in Bergslagen („Stripa“, Zentralschweden, ca. 230 km W Stockholm) als Untertagelabor.

Parallel zu diesen Arbeiten wurden in ganz Schweden bis 1985 Übersichtsstudien zur Ausweisung von möglicherweise für den Bau eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente geeigneten Gesteinsformationen durchgeführt. Abb. 33 zeigt eine im Ergebnis dieser Arbeiten erstellte Karte Schwedens, auf der potenziell geeignete Gebiete zum Endlagerbau ausgewiesen wurden. Die größtenteils auf bereits vorliegenden Daten basierenden Untersuchungen ergaben, dass große Teile der kristallinen Gesteine Schwedens für die Endlagerung prinzipiell geeignet sein könnten.

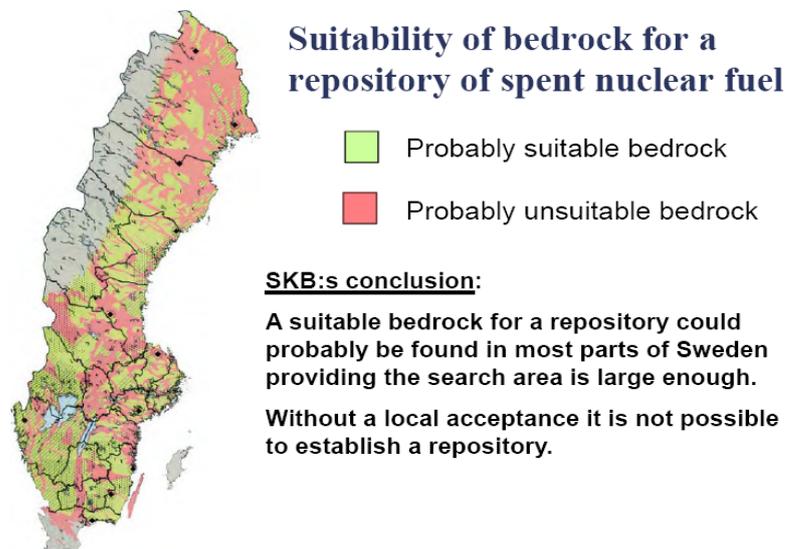


Abb. 33: Geographische Karte Schwedens, auf der die prinzipiell für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente geeigneten Kristallingebiete in hellgrün dargestellt sind (FZKA 2008)

Im Rahmen erster, noch sehr grober Standortuntersuchungen wurden an zehn Orten Tiefbohrungen realisiert (Abb. 34). Gegenstand der standortbezogenen Untersuchungen waren vor allem Art, Ausbildung, Alter und Deformationsgrad des schwedischen Grundgebirges. Außerdem wurden im Ergebnis der Untersuchungen Aussagen zur Erzführung, zu Vorkommen neotektonisch aktiver Deformationszonen bzw. von Störungszonen oder Bereichen erhöhter Klüftigkeit sowie zu den jeweils vorherrschenden hydraulischen Gradienten und zur Grundwasserchemie getroffen.

Siting history

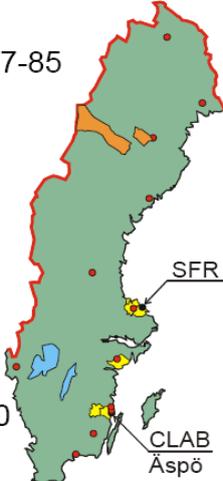
- Drilling at about 10 study-sites, 1977-85
 - Siting of CLAB, 1976-79
 - Siting of SFR, 1980-83
 - Siting of Äspö, 1986-89
 - Feasibility studies, north 1993-97
 - Local referenda, 1995 and 1997:
70% and 53% said No
 - Feasibility studies, south 1995-2000
- 

Abb. 34: Zeitlicher Ablauf der regionalen Standortuntersuchungen für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente im kristallinen Grundgebirge Schwedens (CLAB – Zentrales Zwischenlager, SFR – Spent fuel repository, FZKA 2008)

In dieser Zeit wurde umfangreiches, nach Meinung der Regierung und von Sachverständigen ausreichendes Datenmaterial zur Vorbereitung einer Standortvorauswahl gesammelt. Auf der Grundlage dieser Daten genehmigte die schwedische Regierung 1984 das „KBS-3-Konzept“ zur untertägigen Endlagerung von Wärme entwickelnden hochradioaktiven Abfällen in tiefen kristallinen Wirtsgesteinen. Außerdem wurde ausgehend von den Untersuchungsergebnissen die Standortentscheidung für ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in der Nähe des KKW Forsmark (bei Uppsala) in granitoiden Gesteinen etwa 50 m unterhalb der Ostsee getroffen, das seit 1988 in Betrieb ist.

Außerdem wurde nach umfangreichen, zwischen 1986 und 1989 stattgefundenen Erkundungsarbeiten von SKB entschieden, ab 1990 am Standort Äspö (SE Schweden, Insel nahe der Halbinsel Simpevarp, ca. 2 km entfernt vom KKW Oskarshamn, etwa 200 km S Stockholm) in einer Tiefe von 460 m ein weiteres URL („Hard Rock Laboratory Äspö“) zu bauen. Die Auffahrung des URL (3,6 km langer Tunnel und ein Schacht) war 1995 weitgehend abgeschlossen. Es dient zur Erweiterung der Kenntnisse bezüglich der Wirtsgesteinseigenschaften, zur Weiterentwicklung der In-situ-Messmethoden und zur Entwicklung bzw. Erprobung der geotechnischen Barrieren, d. h. zur Detailisierung des Endlagerkonzeptes, sowie zur Verbesserung der Einlagerungsmethoden und der Auffahrttechnik. Es befindet sich in z. T. stark geklüfteten, ca. 1750 Mio. a alten Småland-Graniten (Granodiorite bis Quarzmonzonite), in denen vereinzelt magmatische Gänge oder vulkanische Einschlüsse beobachtet werden (Abb. 35). Bei der Auffahrung des URL's wurden stark wasserführende regionale Störungszonen angeschnitten, was trotz Abdichtung mit Spritzbeton den Zufluss großer Wassermengen zur Folge hat (aktuell etwa 1,6 m³ Wasser pro Minute; RHÉN et al. 1997). Seit 1985 werden abgebrannte Brennelemente im zentralen Zwischenlager CLAB in der Nähe des KKW Oskarshamn zwischengelagert.

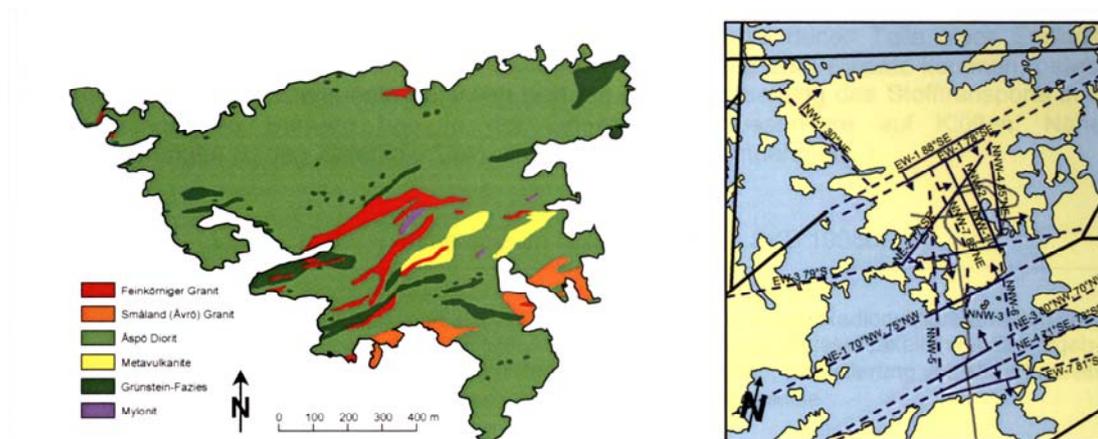


Abb. 35: Schematische geologische Karte und Lage mächtiger Störungszonen im Umfeld des URL Äspö auf der Halbinsel Simpevarp, bei Oskarshamn (Quelle SKB)

An die übersichtsmäßigen Untersuchungen zur Standortauswahl der 1980er Jahre schlossen sich „Allgemeine Studien zur Standortauswahl“ (general siting studies) an. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde anhand von bereits vorhandenen Daten zur Gesteinszusammensetzung, Erzführung und zum Vorkommen von Deformationszonen analysiert, ob die Möglichkeit zur Endlagerung in Gemeinden besteht, die bereits nukleare Einrichtungen beherbergen. Darauf aufbauend erfolgten von 1993 bis 2000 Machbarkeitsstudien (feasibility studies) anhand von bereits existierenden Unterlagen. In einer ersten Phase wurden Eignungsbewertungen für zehn Gebiete durchgeführt, wozu die Zustimmung der betroffenen Gemeinden erforderlich war. Für acht Standortregionen (siehe Abb. 36) wurden vorläufige Standortcharakterisierungen angefertigt: Storuman, Malå, Östhammar, Nyköping, Oskarshamn, Tierp, Älvkarleby und Hultsfred. Als Kriterien für die Standortbewertung dienten neben den strukturgeologischen Voraussetzungen z. B. auch die mechanische Stabilität des Gebirges, die geochemischen Bedingungen im Einlagerungsniveau, die Transportmöglichkeiten für aus dem Endlager freigesetzte Radionuklide und die bergbaulichen Gegebenheiten für den Endlagerbau. Daneben nahmen raumplanerische Faktoren (konkurrierende Landnutzung, Transportmöglichkeiten für den Abfall, nationale Interessen bei der Landnutzung), soziologische Gründe wie Bewertungen des Einflusses des Endlagers auf die Gesellschaft und die Umwelt sowie ökonomische Aspekte (Transportkosten, vereinfachtes Handling bei räumlicher Konzentration der Anlagen) einen hohen Stellenwert ein. Nach dem Ausscheiden von Malå und Storuman (Gemeindereferenden gegen den Endlagerbau) wurden auf der Grundlage dieser detaillierten Machbarkeitsstudien für fünf Standortregionen im südlichen und zentralen Bereich Schwedens positive Bewertungen vorgenommen (Abb. 36).

Auf der Grundlage einer langzeitsicherheitlichen Bewertung der Erkundungsdaten, insbesondere der vorliegenden strukturgeologischen Befunde, reduzierte sich die Anzahl der Standortalternativen auf drei Regionen (Abb. 36): Uppsala-County (Standorte

Forsmak, Hargshamn und Tierp), Södermanlands-County (Gemeinde Nyköping mit zwei Standorten) und Kalmar-County (Gemeinde Oskarshamn mit zwei Standorten und die Gemeinde Hultsfred mit einem Standort). Die Standorte wurden im Zeitraum 1997 bis 2001 erneut einer Machbarkeitsstudie unterzogen. SKB benannte daraufhin drei Standorte für detaillierte geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten: Oskarshamn, Östhammar (Forsmark) und Tierp. Tierp lehnte die für detaillierte Standortbewertungen erforderlichen Erkundungsbohrungen ab und schied damit aus dem Suchverfahren aus.

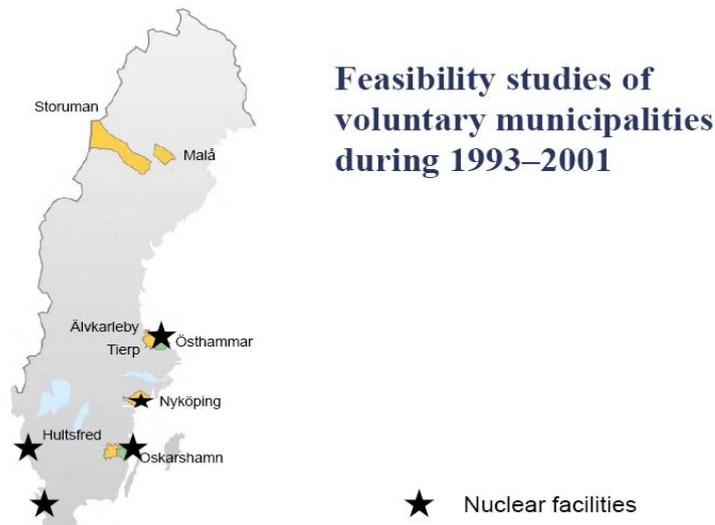


Abb. 36: Vorausgewählte Regionen für die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in Schweden (FZKA 2008)

Ziel der 2002 begonnenen und 2008 abgeschlossenen übertägigen Untersuchungen (inklusive umfangreicher Bohrarbeiten) der alternativen Standorte Laxemar (Oskarshamn) (SKB 2006b) und Forsmark (Östhammar) (SKB 2008) war es, auf der Grundlage genauer Kenntnisse zur Standortgeologie die Fläche des Untersuchungsgebietes schrittweise bis auf 4 bis 5 km², die nach Einschätzung von SKB für den Endlagerbau erforderlich sind, einzuengen. So reduzierte sich z. B. unter Zugrundelegung der geologisch-geophysikalischen Untersuchungsbefunde im Verlaufe der schrittweise durchgeführten Arbeiten am Standort (ca. 30 km N Oskarshamn) die Fläche des untersuchten Gebietes von anfänglich 60 km² auf die geforderten 5 km², die im S- und W-Teil des Teilgebietes Laxemar liegen (Abb. 37). Das ursprünglich ebenfalls untersuchte, weiter östlich gelegene Teilgebiet Simpevard wurde auf der Grundlage relativ früh erzielter Erkundungsergebnisse nicht weiter betrachtet.

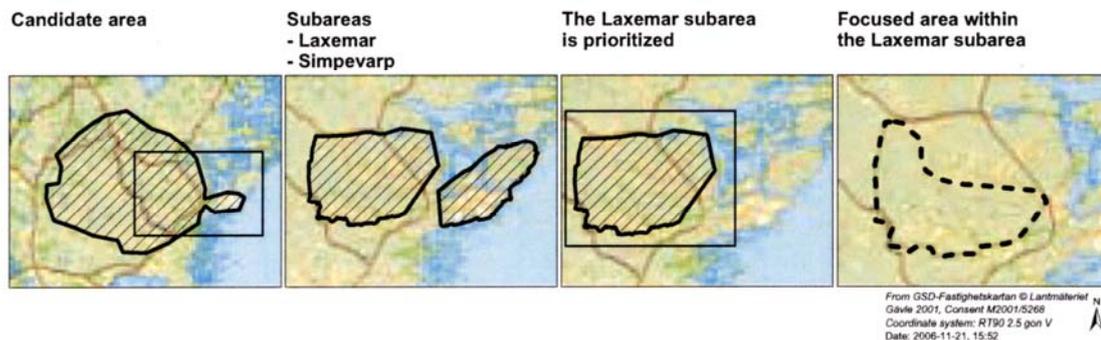


Abb. 37: Schrittweise Reduzierung der Untersuchungsfläche für die Auswahl eines Standortes für ein Brennelemente-Endlager am Standort Oskarshamn (SKB 2007)

Zur Benennung des endgültigen Standortes für das schwedische Brennelemente-Endlager wurden die oberflächennahen Schichtenfolgen (Deckgebirge) und die Grundwasserverhältnisse durch hydrogeologische Untersuchungsbohrungen (z. B. 80 Bohrungen in Forsmark) erkundet. Nicht gekernte Erkundungsbohrungen (z. B. 40 Bohrungen in Forsmark) sollten Auskunft geben über die Lage und Eigenschaften der größten Störungszonen im Untersuchungsgebiet, die räumliche Orientierung und Vernetzung der Trennflächensysteme und die hydraulischen Gradienten in den granitischen Wirtsgesteinen. Kernbohrungen liefern Daten zur Ausbildung bzw. Variationsbreite und zu den Eigenschaften der Gesteinsschichten, über die mineralogisch-petrographischen Veränderungen der Gesteine im Umfeld der vorkommenden Störungszonen und über die Grundwasserzirkulation. Die geophysikalische Instrumentierung der Kernbohrungen dient zur Charakterisierung der Stressbeanspruchung der Gesteine. Die quartären Ablagerungen (Bodenbildungen) werden durch übertägig eingesetzte geophysikalische Verfahren in ihrer Ausdehnung und in ihrer Zusammensetzung untersucht.

Anfang 2009 wurde für beide Standorte ein Sicherheitsbericht vorgelegt, auf deren Grundlage am 03.06.2009 der Standort Forsmark als Standort für das zu errichtende Endlager festgelegt wurde. Die Auswahlentscheidung für Forsmark basiert v. a. auf Langzeitsicherheitsbewertungen, die für diesen Standort im Vergleich zu Laxemar trockenere Bedingungen und eine geringere Klüftigkeit auswiesen. Außerdem wurde nachgewiesen, dass der Platzbedarf für das geplante Endlager am Standort Forsmark geringer ist, was die Kosten des Endlagerbaus deutlich reduziert. 2010 soll für den Standort Forsmark der Genehmigungsantrag zur Errichtung des Endlagers eingereicht werden.

Das Endlager wird nach Vorlage der Genehmigung wahrscheinlich ab 2013 entsprechend dem schwedischen Entsorgungskonzept stufenweise errichtet. Begonnen wird am ausgewählten Endlagerstandort mit dem Bau eines URL. Nach Abschluss der Untersuchungen im URL und nach Vorlage eines auf den Ergebnissen dieser Arbeiten basierenden positiven Langzeitsicherheitsnachweises werden ca. 5 bis 10 % des vorgesehenen Gesamtabfallinventars zu Demonstrationszwecken eingelagert. Der Beginn

der Versuchseinlagerung ist für 2023 vorgesehen. Erst bei positiver Gesamtbewertung der Versuchseinlagerung erfolgt der Bau des eigentlichen Endlagers.

4.3 Frankreich

Seit ca. 1960 werden in Frankreich durch das Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) und die L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) Studien zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen durchgeführt (CNE 1995). Im Unterschied zu Deutschland und den skandinavischen Ländern errichtete Frankreich Endlager für seine schwach- und mittelradioaktiven Abfälle oberirdisch. Von 1966 bis 1994 wurden im Centre de la Manche bei La Hague und seit 1992 im Centre de l'Aube, etwa 250 km E Paris und 40 km E Troyes, derartige Abfälle in großen Wällen auf der Erdoberfläche deponiert. Parallel dazu erfolgten bereits in den 1970er Jahren erste Bewertungen der in Frankreich existierenden Ton-, Schiefer-, Salz- und Granitvorkommen bezüglich ihrer Eignung als Endlagerstandorte.

In Anlehnung an die auf Salzformationen als Wirtsgesteine für die HAW-Endlagerung konzentrierten Arbeiten in den USA und Deutschland wurden auch die Salzvorkommen Frankreichs (Abb. 38) diesbezüglich analysiert. Im Vergleich zu diesen beiden Ländern verfügt Frankreich nur über eine geringe Anzahl von Salzlagerstätten. Es werden Salzvorkommen mesozoischen und tertiären Alters beschrieben, wobei lediglich im SW des Landes, im Bereich des Aquitaine-Beckens (südlich Bordeaux) Salzstöcke zu beobachten sind. Weitere mesozoische Salzformationen kommen in flacher Lagerung im Östlichen Pariser Becken (zwischen Paris und den Vogesen) sowie in Form von Keuper- bzw. Muschelkalkbildungen im Bereich des französisch-schweizerischen Jura in Ostfrankreich vor. Die tertiären, flach lagernden Salzbildungen sind an das Tertiärgrabensystem gebunden, das vom Elsass (Oberrheingebiet) über den Rhone-Graben bis nach Marseille reicht (Abb. 38).

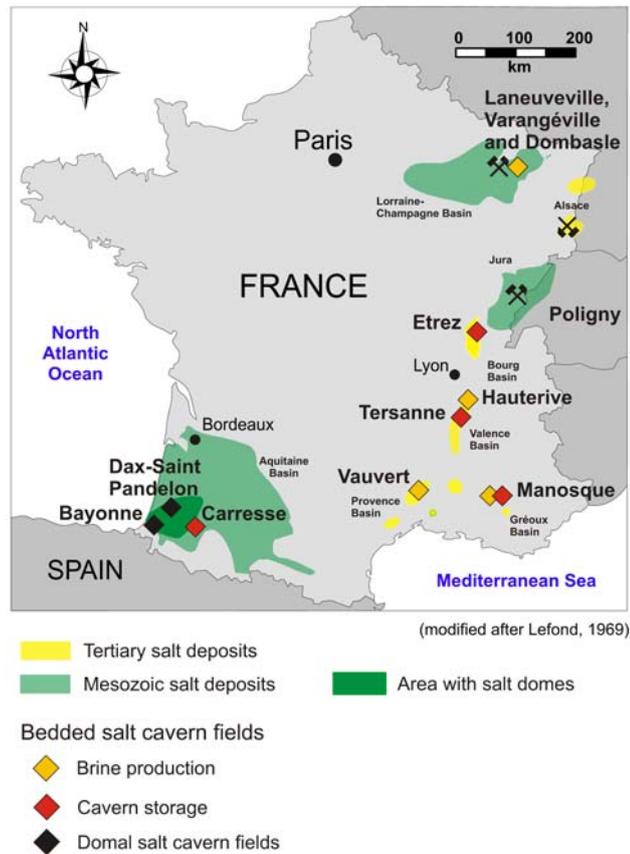


Abb. 38: Verteilung der Salzlagerstätten unterschiedlichen Alters in Frankreich (KBB 2007)

Die Dominanz von flach lagernden Salzvorkommen, die im Vergleich zu Salzstöcken meist schlechter für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet sind (siehe Kap. 2.2), und zu erwartende Interessenskonflikte wegen der Begrenztheit der wirtschaftlich nutzbaren Salzlagerstätten führten Anfang der 1990er Jahre dazu, dass Salz als Endlagerwirtsgestein nicht weiter verfolgt wurde. Die Salzstöcke im Süden des Landes werden bevorzugt für die Errichtung von Speicherkavernen für Gas oder Erdölprodukte genutzt (Abb. 38). Außerdem sind viele französische Salzvorkommen ausgehend von den geologischen Lagerungsverhältnissen sowie infolge ungünstiger geologischer Rahmenbedingungen (z. B. erhöhte Erdbebengefährdung in den Regionen) für eine HAW-Endlagerung nicht (z. B. Salzvorkommen im Oberrheintalgraben) bzw. nur wenig geeignet.

Ab 1982 wurden im Ergebnis eines landesweiten Screenings französische Gebiete mit potenziell für die Endlagerung hochradioaktiver Abfallstoffe geeigneten Wirtsgesteinen ausgewiesen. Auswahlkriterien für die Abgrenzung der möglicherweise geeigneten Standortregionen waren u. a. das Vorhandensein homogener und gering wasserdurchlässiger Schichten in wenig gestörten und tektonisch möglichst stabilen Gebieten. 1987 wurde die ANDRA von der Regierung beauftragt, in den nachfolgend genannten vier Regionen detaillierte Untersuchungen durchzuführen (CNE 1995, siehe Abb. 39):

- Tonsteinformation im Departement Aisne (1),
- flach lagernde Salzformation im Departement Ain (2),
- Granitformation im Departement Deux-Sèvres (3) sowie
- Tonschieferformation im Departement Maine-et-Loire (4).



Abb. 39: Lage der im ersten Standortsuchverfahren ausgewiesenen vier potenziell geeigneten Endlagerregionen in Frankreich

Diese Standortvorauswahl erfolgte ohne Konsultationen mit den betroffenen Regionen. Aufgrund von erheblichen Widerständen wurden 1989 die geologischen Erkundungsarbeiten in allen genannten potenziellen Standortregionen abgebrochen, gleichzeitig wurde ein Moratorium bezüglich der Fortsetzung dieses ersten landesweiten Standortauswahlprozesses verhängt.

Nach der einstimmigen Verabschiedung des durch eine speziell dafür berufene parlamentarische Kommission erarbeiteten „Gesetzes über die Behandlung radioaktiver Abfälle“ am 30.12.1991 (ANDRA 1991) wurde 1992 ein neues Suchverfahren begonnen. Grundlage für die Standortauswahl ist die „Basic Safety Rule n° III.2.f“ (DSIN 1991), in der die Rahmenbedingungen und die Auswahlkriterien für einen Endlagerstandort in tiefen geologischen Formationen definiert wurden. In der ersten Phase dieses zweiten Auswahlverfahrens wurde der Abgeordnete Cristian Bataille, der wesentlich an der Erarbeitung des Gesetzes mitgewirkt hatte, beauftragt, im Konsens mit den Departements mögliche Standortregionen auf Freiwilligkeitsbasis zu suchen. Aufgrund dieses Mediationsverfahrens haben 30 Departements potenziell geeignete Bereiche

ausgewiesen und sich um die Durchführung von detaillierten Untersuchungen auf ihrem Gebiet beworben.

Unter Zugrundelegung der im ersten Suchverfahren zusammengestellten Informationen und Daten sowie der inzwischen weiter präzisierten Kenntnisse zu den Standortanforderungen (DSIN 1991) und Isolationseigenschaften unterschiedlicher Gesteinstypen wurden 1994 anhand der bereits vorliegenden Daten, d. h. ohne spezielle Standortuntersuchungen, vier potenzielle Standortgebiete ausgewählt (Abb. 40):

- Schluffstein-Mergel-Formation bei Marcoule im Departement Gard (rot, 4),
- Granitformation unter Sedimentbedeckung bei La Chappelle-Baton im Departement Vienne (gelb, 3),
- Tonsteinformation bei Bure im Departement Meuse (lila, 1) sowie
- Tonsteinformation im Departement Haute Marne (grün, 2).



Abb. 40: Verteilung der im zweiten Suchverfahren ausgewiesenen potenziell geeigneten Standortregionen in Frankreich (Erläuterungen siehe Text)

Die beiden letztgenannten Gebiete wurden später zusammengefasst. Bei der Vorauswahl dieser möglichen Endlagerstandortregionen wurde darauf geachtet, dass politische Akzeptanz für das Endlagerprojekt in den betroffenen Regionen vorhanden war. Im Anschluss an diese Vorauswahl wurde die ANDRA mit Untersuchungen hinsichtlich des Vorhandenseins der geologischen Voraussetzungen für den Bau von Untertagelaboren in den ausgewählten Standortgebieten beauftragt. Parallel dazu erfolgten Studien zur

Klärung der grundsätzlichen Eignung der genannten geologischen Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.

In den vier potenziellen Standortregionen wurden von 1994 bis 1996 Voruntersuchungen in Form von geologischen Oberflächenkartierungen, seismischen Messungen und Erkundungsbohrungen durchgeführt (ANDRA 1997a, 1997b, 1997c, ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009). Auf der Grundlage der dabei erzielten Befunde wurde ein Vergleich der Endlagerungsoptionen an den vier Standorten vorgenommen. Die Untersuchungen der Granitoidformation im Departement Vienne ergaben einen zu diesem Zeitpunkt für die Durchführung eines Sicherheitsnachweises ungenügenden Kenntnisstand zum geologischen Aufbau und zu den Barriereigenschaften der granitoiden Wirtsgesteine. Trotz hohen Erkundungsaufwandes lassen sich Vorkommen von hydraulisch aktiven Störungszonen in den für den Endlagerbau vorgesehenen Granitoidformationen höchstwahrscheinlich nicht vollständig ausschließen. Daraus ergeben sich große hydrogeologische Unsicherheiten und Zweifel an der Intaktheit der Barrierefunktion dieses Wirtsgesteinstyps (CNE 1996, 1997). Ein Endlager in Granitoiden muss infolge dieser langzeitlichen Unsicherheiten wahrscheinlich in mehrere Bereiche aufgeteilt werden, was einen großen Flächenbedarf und hohe Kosten für den Endlagerbau zur Folge hat (ANDRA 1999). Außerdem verkompliziert eine häufig zu beobachtende mächtige sedimentäre Überdeckung der Granitoidkomplexe die geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten, wie z. B. die Abgrenzung von hydraulisch aktiven Störungszonen bzw. die Ausweisung von möglichst homogenen Gesteinsblöcken.

Aufgrund des noch ungenügenden Kenntnisstandes zur Möglichkeit einer HAW-Endlagerung in den französischen Granitoiden wurden weitere diesbezügliche generische Untersuchungen initiiert und die Beteiligung Frankreichs an Forschungsprojekten in URL's in kristallinen Gesteinen (z. B. ONKALO, Finnland; Äspö, Schweden; Grimsel, Schweiz und Lac du Bonnet, Canada) festgelegt. Im Ergebnis dieser Forschungsarbeiten wurde die prinzipielle Eignung granitoider Gesteine für die HAW-Endlagerung unterstrichen und für den Fall der Nutzung dieser Endlagerungsoption die Notwendigkeit weiterer standortbezogener Untersuchungen herausgearbeitet (ANDRA 2005a, b).

Nach Auswertung der geowissenschaftlichen Untersuchungen, der vorläufigen Endlagerkonzepte und erster Sicherheitsanalysen fiel im Dezember 1998 die politische Entscheidung für die am östlichen Rand des Pariser Beckens gelegene Standortregion Meuse/Haute Marne (ANDRA 2002, 2006). Detaillierte Informationen zur Vorgehensweise bei der Standortentscheidung sowie zu den dabei angewandten Kriterien und Gründen für die Standortauswahl wurden nicht publiziert bzw. sind nicht frei zugänglich. Neuere Berichte der ANDRA enthalten keine diesbezüglichen Informationen bzw. Verweise. Die politische Entscheidung für die Standortregion Meuse/Haute Marne ist nur in soweit transparent, als dass der Öffentlichkeit mitgeteilt wurde, dass von den vorausgewählten

Standorten derjenige ausgesucht wurde, der aufgrund der Voruntersuchungen und unter Berücksichtigung der gesetzlichen Richtlinien die besten Standortfaktoren aufweist. Die wichtigsten Gründe für die Auswahl der Region Meuse/Haute Marne waren:

- das einfach gebaute geologische Umfeld (siehe Abb. 41),
- das Vorkommen von nur wenigen Störungszonen, die sich gut seismisch detektieren lassen,
- die seismologische Stabilität der Region,
- die große Mächtigkeit (ca. 130 m) und Homogenität der Tonschicht,
- die sehr geringe Permeabilität,
- das hohe Sorptionsvermögen sowie
- die große Verbreitungsfläche des Endlagerwirtsgesteins, d. h. das Vorhandensein vieler Standortalternativen.

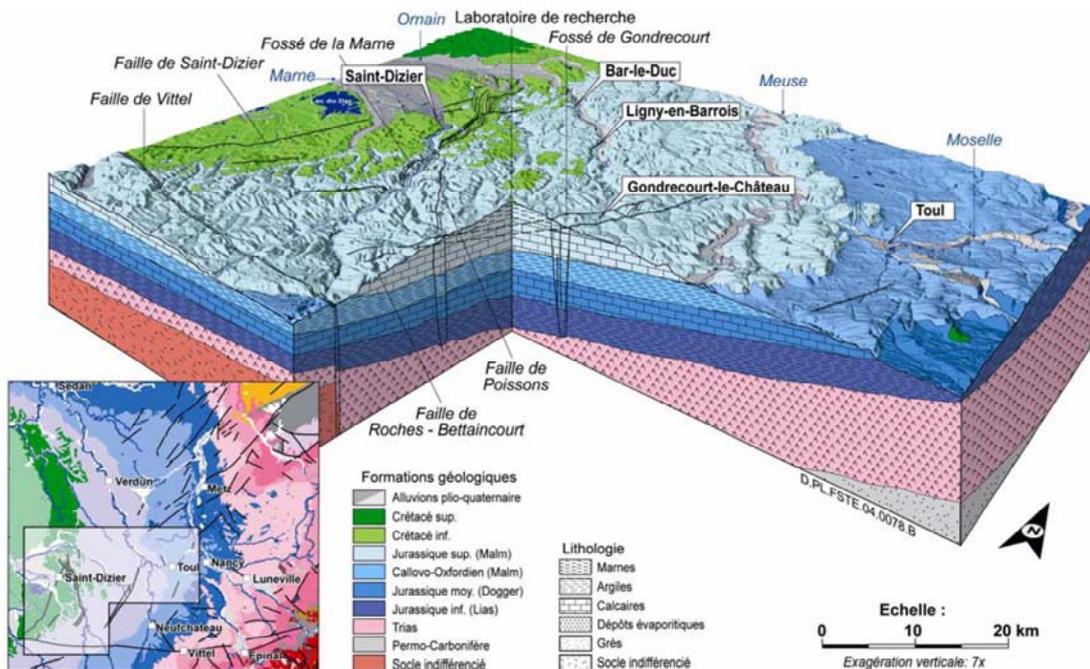


Abb. 41: Geographische Lage des URL Bure und schematisches geologisches 3D-Modell zum Tiefenbau der Region (ANDRA 2005c)

Ende 1998 wurde die ANDRA ermächtigt, in der Nähe des Dorfes Bure, etwa 230 km E Paris, ein Untertagelabor (URL) für standortbezogene In-situ-Analysen zu errichten. Der ursprünglich noch geplante Bau eines zweiten Untertagelabors im Granit wurde ausgesetzt. In der Region Meuse/Haute Marne besteht die potenzielle Wirtsgesteinsformation aus Tonsteinen des Callovo-Oxfordian (mittlerer bis oberer Jura, ca. 155 Mio. Jahre alt) mit

einer lateralen Ausdehnung von ca. 200 km² und einer Mächtigkeit von ca. 130 m. Die Gesteine des Callovo-Oxford fallen mit 1° bis 1,5° nach NW ein und lagern in dieser Region in einer Teufe zwischen 420 und 540 m, bei einer durchschnittlichen Tiefenlage von ca. 500 m (Abb. 42).

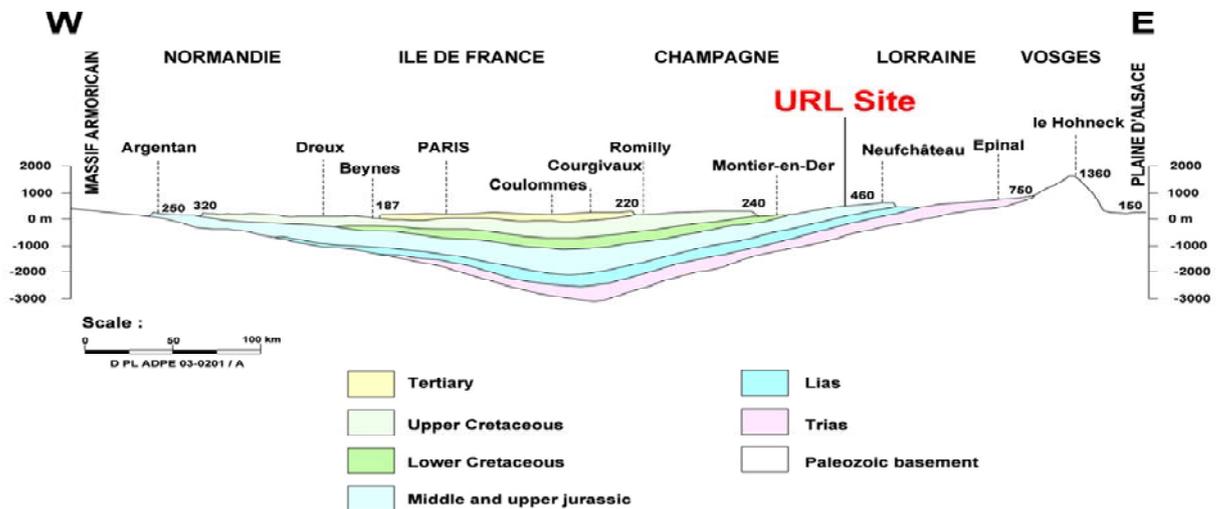


Abb. 42: Vereinfachter geologischer Schnitt durch das Pariser Becken und Lage des URL Bure innerhalb dieser Struktur (ANDRA 2005c)

Vor Beginn der Errichtung des URL's im Jahr 1999 wurden am Standort Bure geologische Spezialkartierungen, 3D-seismische Messungen und ein umfangreiches geowissenschaftliches Untersuchungsprogramm in Tiefbohrungen durchgeführt (ANDRA 2001, ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009). In einer ersten Phase des Untertagelaborbetriebes wurden von 2003 bis 2005 zahlreiche wissenschaftliche Versuche, z. T. in enger Kooperation mit ausländischen Partnern realisiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an der Erdoberfläche und im URL wurden 2005 dem französischen Parlament in Form einer Machbarkeitsstudie (Dossier Argille 2005) übergeben. In dieser Studie sind die geowissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse (inklusive Endlagerkonzept) für den Bau eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Callovo-Oxfordian-Tonstein der Region Meuse/Haute Marne zusammengestellt. Die Studie umfasst zahlreiche, thematisch breit gefächerte Einzelberichte unterschiedlichen Detaillierungsgrades. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgte u. a. in zwei Berichten (ANDRA 2005a-d). Das Untersuchungsprogramm der ANDRA wird von der Commission Nationale D'Evaluation (CNE) fortlaufend evaluiert (z.B. CNE 1995, 1999, 2001, 2006, 2007, 2008). Ergänzend dazu erfolgen Evaluierungen durch die l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Das "Dossier Argille 2005" wurde durch die OECD/NEA (Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency) peer-reviewed (OECD 2003, 2006).

Auf der Basis des „Dossier Argille 2005“ wurde am 31.05.2006 vom französischen Parlament ein ergänzendes Gesetz zur Endlagerung (Loi n°2006-739 du 28 juin 2006, ANDRA 2006) verabschiedet, das die ANDRA ermächtigt, mit den wissenschaftlichen Untersuchungen im URL Bure fortzufahren und Erkundungsarbeiten zur Suche eines endgültigen Standortes in einem Bereich von ca. 200 km² in der Region Meuse/Haute Marne durchzuführen. Ziele und Zeitplan des weiteren Vorgehens bei der Standortauswahl sind in ANDRA (2007) zusammengefasst. In den Jahren 2007 bis 2015 sind schwerpunktmäßig weitere Labor- und In-situ-Studien zur Charakterisierung der Tonsteine (Untersuchung der Eigenschaften und der im Endlager ablaufenden Prozesse), ergänzende übertägige geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten zwecks Auswahl eines definitiven Endlagerstandortes (Verringerung der Fläche von 200 km² auf ca. 30 km²) und Weiterentwicklungen des Endlagerkonzeptes unter Einschluss der Transport- und Einlagerungstechnik vorgesehen (siehe auch HAMMER et al. 2009). Die Festlegung der Arbeitsschwerpunkte erfolgte unter Berücksichtigung der durch die NEA und die nationale französische Evaluierungskommission CNE durchgeführten Bewertung des „Dossier Argille 2005“ und der daraus resultierenden Empfehlungen. Hauptziel dieser Arbeiten ist es, mit exakteren und detaillierteren Standorterkundungsdaten in den Langzeitsicherheitsnachweis zu gehen und das Fehlen einer Umweltgefährdung im geforderten Isolationszeitraum nachzuweisen.

Im Zeitraum von 2007 bis 2009 erfolgt die Untersuchung der vorausgewählten Region mit weiteren 6 Tiefbohrungen und 2D-Seismik (ausführlicher in HAMMER et al. 2009). Parallel dazu werden im URL Bure etwa 600 m Strecken neu aufgefahren, 230 Bohrungen gestoßen und 2000 Sensoren installiert sowie 25 wissenschaftliche Experimente unter Beteiligung von ausländischen Projektpartnern durchgeführt. Die daraus gewonnenen Informationen und die Ergebnisse der im Zeitraum 2010/2011 durchzuführenden geologischen Erkundungsarbeiten an dem nun enger begrenzten Standort (vor allem 3D-Seismik zwecks Verbesserung der Kenntnisse zur räumlichen Lage tektonischer Störungszonen in der Wirtsgesteinsformation und Bohrungen für hydrogeologische Untersuchungen und zur Probenahme für geomechanische und mineralogisch-geochemische Analysen) bilden die Grundlage für ein abschließendes Dossier, das 2012 vorgelegt und 2013 öffentlich diskutiert werden soll. Im Ergebnis der angestrebten breiten Diskussion soll eine einvernehmliche Standortentscheidung getroffen werden.

Die Resultate sollen 2015 der französischen Regierung in Form eines Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager in der ausgewählten Tonformation vorgelegt werden, der die Grundlage für den laut „Plan National de Gestion des Matieres et des Dechets Radioactifs“ im Jahr 2015 zu stellenden Genehmigungsantrag bildet. Möglicherweise wird in Analogie zur Vorgehensweise in anderen Ländern am letztendlich ausgewählten Standort zunächst ein Untertagelabor errichtet. Bei entsprechender Eignung des Standortes soll voraussichtlich 2025 das Endlager in Betrieb gehen.

4.4 Schweiz

Das schweizerische Atomgesetz von 1978 fordert für den Bau neuer Kernkraftwerke einen Entsorgungsnachweis für die dabei anfallenden radioaktiven Abfälle, der sich aus Langzeitsicherheits-, Standort- und Machbarkeitsnachweis zusammensetzt. Die Ausarbeitung des Gesetzes führte dazu, dass sich die Schweiz ab Mitte der 1970er Jahre intensiv mit der Erarbeitung eines nationalen Konzeptes zur Entsorgung der bei der zivilen Nutzung der Kernkraft entstehenden Abfälle beschäftigen musste. Ein erstes, 1978 vorgestelltes Konzept für die Entsorgung nuklearer Abfälle war noch sehr allgemein gehalten und sah lediglich vor, die radioaktiven Abfälle in geeigneten tiefen geologischen Formationen endzulagern. Die Schweiz spricht im Gegensatz zu Deutschland nicht von Endlagerung, sondern von Tiefenlagerung.

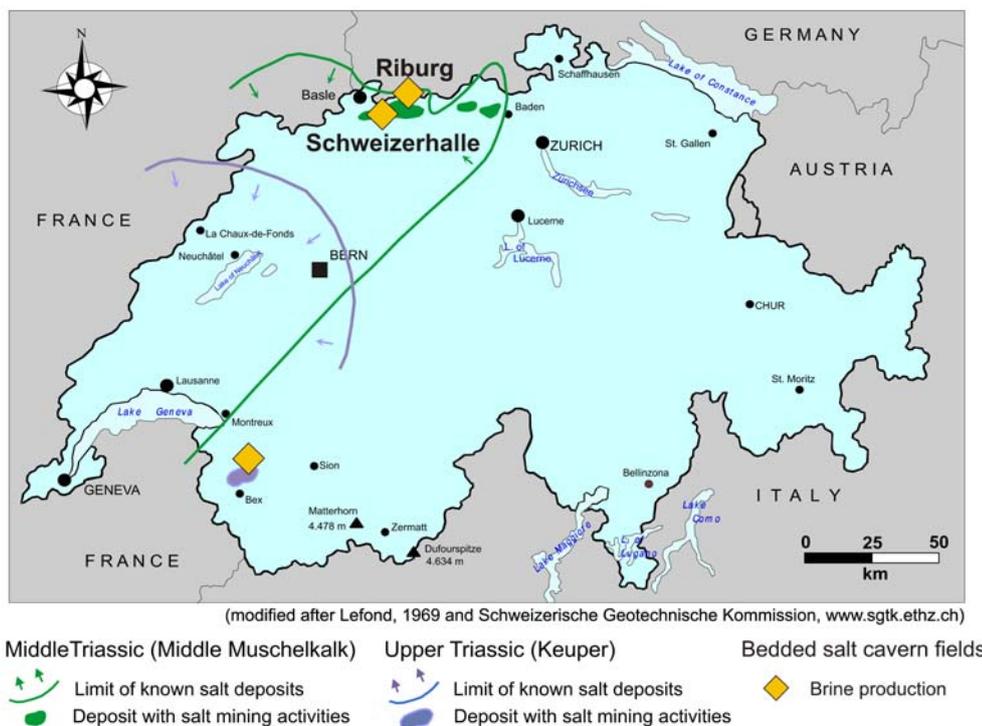


Abb. 43: Verteilung der Salzlagerstätten in der Schweiz (KBB 2007)

Die Schweiz verfügt u. a. wegen der geringen Anzahl von wirtschaftlich nutzbaren Salzlagerstätten (Nutzungskonflikte), des Fehlens von Salzstöcken und zu geringen Salzmächtigkeiten in den flach lagernden Salzvorkommen im Norden des Landes (Abb. 43) sowie infolge der Lage der Salzvorkommen in seismisch aktiven Zonen über keine für die HAW-Endlagerung geeigneten Salzvorkommen. Deshalb konzentrierten sich in der Anfangsphase der Standortsuche in der Schweiz die Arbeiten auf das Auffinden eines geeigneten Endlagerstandortes im Kristallin. Endlagerungsoptionen im Tonstein spielten in der frühen Phase des Auswahlprozesses in der Schweiz noch keine Rolle. Erst später (NAGRA 2005) wurde festgelegt, dass für folgende geologische Einheiten geprüft

werden soll, ob sie unter Zugrundelegung eines Mehrbarrierensystems für eine sichere HAW-Endlagerung geeignet sind (Abb. 44):

- Kristallines Grundgebirge der Nordschweiz (Gebiet nördlich des Nordschweizer Permokarbondtroges mit den Bohrungen Riniken und Weiach), das in zwei Teilgebiete unterteilt wurde (Gebiet „West“ mit den Bohrungen Böttstein, Lenggeren und Kaisten sowie das Gebiet „Ost“ mit der Bohrung Siblingen),
- Vorkommen von Opalinuston, z. B. Zürcher Weinland und Jurasüdfuß sowie
- tonreiche Gesteine der unteren Süßwassermolasse.

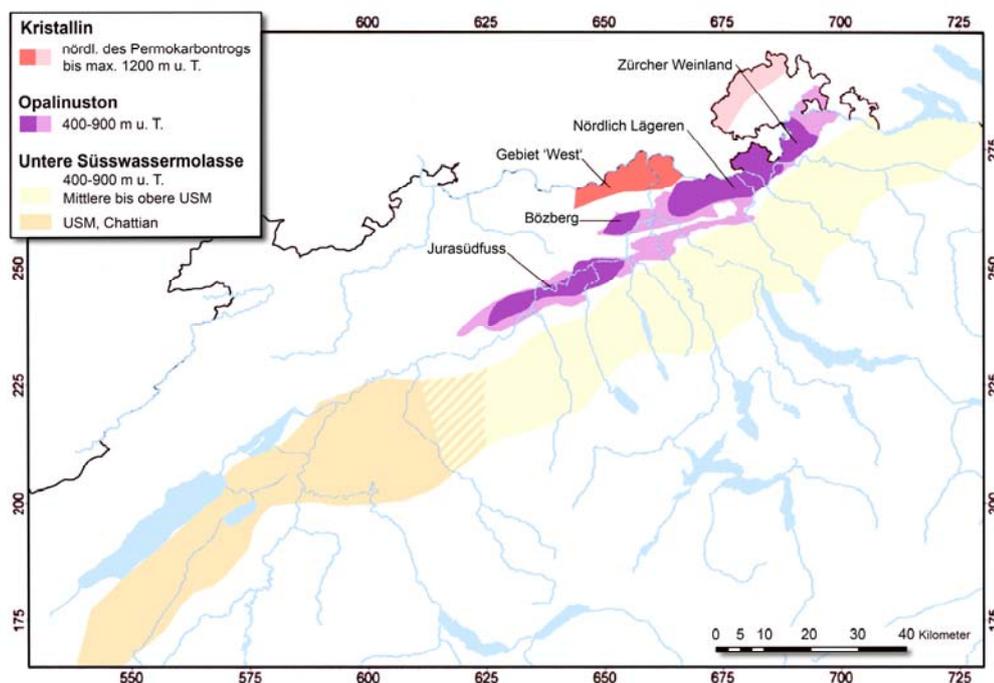


Abb. 43: Verteilung der potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneten Gesteinsformationen in der Schweiz (NAGRA 2005)

Die Anfang der 1980er Jahre durchgeführte Vorauswahl der potenziellen Standortregionen im Kristallin basierte im Wesentlichen auf folgenden Auswahlkriterien (NAGRA 1985):

- ausreichende laterale Ausdehnung des Wirtsgesteins,
- günstige lokale tektonische Situation (geringe Deformation und Zerblockung der Gesteine),
- günstige Ausbildung des Wirtsgesteins (Zusammensetzung, Eigenschaften, Mächtigkeit),

- Tiefe des Endlagers größer 500 m sowie
- Erfüllung nicht-geologischer Auswahlkriterien, wie z. B. raumordnerische Faktoren oder Fehlen von Nutzungskonflikten.

Eine wesentliche Präzisierung erfuhr das schweizerische Entsorgungskonzept in dem Ende 1985 veröffentlichten Abschlussbericht des durch die privatwirtschaftliche Nationale Genossenschaft für die Entsorgung radioaktiver Abfälle (NAGRA) realisierten Projektes „GEWÄHR“ (NAGRA 1985). Das Projekt diente zur Prüfung der Möglichkeiten einer HAW-Endlagerung im Kristallin der Nordschweiz. Im Rahmen des Projektes „GEWÄHR“ wurden der Sicherheitsnachweis und der bautechnische Machbarkeitsnachweis für die Endlagerung von hoch- und mittelradioaktiven Abfällen (mit langlebigen α -Radionukliden) aus der Wiederaufarbeitung am Beispiel eines Modellstandortes im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz erbracht. Im Ergebnis der Untersuchungen wurde allerdings festgestellt, dass das Kristallin der Nordschweiz in seiner lithologisch-petrographischen Zusammensetzung, im strukturell-tektonischen Aufbau sowie in der Wasserführung als äußerst heterogenes Gestein anzusehen ist. Außerdem weisen die für den Endlagerbau erforderlichen undeformierten Gesteinsblöcke i.d.R. eine zu geringe Größe auf. Im Verlaufe der Untersuchungen wurden für viele Gebiete im Kristallin der Nordschweiz aufgrund der großen Häufigkeit bzw. Nähe von Thermalwasserbohrungen Nutzungskonflikte offensichtlich.

Der 1985 vorgelegte Abschlussbericht zum Projekt „GEWÄHR“ (NAGRA 1985) stellt ebenso wie die „Kristallin-I-Studie“ der NAGRA (NAGRA 1994b) nicht den Sicherheitsnachweis für ein konkretes Endlagerprojekt im Rahmen eines Bewilligungsverfahrens, sondern die generelle Beurteilung des kristallinen Grundgebirges als mögliches Wirtsgestein dar. Nach Durchsicht der Unterlagen stellte der Bundesrat 1988 demzufolge auch fest, dass durch den vorgelegten Abschlußbericht der Standortnachweis, d. h. der Nachweis von genügend ausgedehnten Gesteinskörpern mit den erforderlichen Eigenschaften noch nicht geführt wurde.

Die Arbeiten zur Standortsuche im kristallinen Grundgebirge der Schweiz erstreckten sich über den Zeitraum von 1981 bis 1993 auf eine Fläche von ca. 1200 km². Im Rahmen dieser Standortsucharbeiten wurden 7 Tiefbohrungen niedergebracht, umfangreiche Untersuchungen in bereits vorhandenen Bohrungen (vor allem in hydrogeologischen Bohrungen) und geologische Spezialkartierungen sowie auf Profilen mit einer Gesamtlänge von mehreren hundert km 2D-Reflexionsseismik durchgeführt (NAGRA 2005). Trotz dieser aufwändigen Erkundungsarbeiten wurde im Kristallin-Synthesebericht der NAGRA (NAGRA 1994a) festgestellt, dass die Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges insgesamt schlecht ist und die Kristallinvorkommen in der Nordschweiz noch nicht genügend belastbar charakterisiert werden können. Die NAGRA selbst sah kaum Chancen, dass ein Standort für ein HAW-Endlager im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz gefunden werden kann.

Ausgehend von den Erkenntnissen des Projektes „GEWÄHR“ wurden seit 1983 im Felslabor Grimsel (ca. 300 bis 450 m unterhalb der Erdoberfläche gelegener Tunnel im granitischen, ca. 290 Mio. a alten Aar-Massiv in der Zentralschweiz, Kanton Bern) zahlreiche In-situ-Experimente zur Untersuchung der Barriereigenschaften granitoider, hochmetamorph überprägter Gesteine durchgeführt (z. B. NAGRA 1999, 2001a). An diesem Standort sind (wie in der gesamten Schweiz und verursacht durch die intensive alpidische Orogenese) die Gesteine granodioritischer Zusammensetzung deutlich geschiefert und metamorph überprägt („Augengneise“). Die In-situ gemessenen Spannungsbeträge der Gesteine variieren zwischen 20 und 40 MPa (PAHL et al. 1989). Für die z. T. stark geklüfteten Gesteine wurden im Ergebnis hydrogeologischer In-situ-Untersuchungen (Pumpversuche, Tracerversuche zur Radionuklidmigration, z. B. NAGRA 1994d, 1995) z. T. stark erhöhte, in Abhängigkeit von der Orientierung der Störungszonen im Verhältnis zu den Spannungsvektoren schwankende hydraulische Durchlässigkeiten bestimmt.

Parallel zu diesen Arbeiten wurde 1993 vorgeschlagen, ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle am zentralschweizerischen Standort Wellenberg in Tonmergelsteinen zu errichten. Die dafür erforderlichen geologischen Erkundungsarbeiten konnten aber aufgrund eines ablehnenden Volksentscheides im Jahr 1995 sowie infolge großer lokaler Widerstände auch bei einem zweiten Versuch 2002 nicht durchgeführt werden.

Zwecks Erweiterung des Kenntnisstandes zu den Barriereigenschaften kristalliner Wirtsgesteine beteiligte sich die Schweiz an Experimenten in anderen, im Kristallin positionierten URL's, vor allem in Schweden (Äspö und Stripa) und führt einen intensiven Erfahrungsaustausch mit Ländern durch, die ebenfalls Endlagerprojekte im Kristallin verfolgten (Finnland, Schweden, Kanada, Frankreich).

In ihrer Stellungnahme zur Kristallin-I-Studie der NAGRA stellte auch die Hauptabteilung Kernsicherheit fest (HSK 2004), dass noch viele offene Fragen vor einer eventuellen Weiterführung des Projektes zur Tiefenlagerung im kristallinen Grundgebirge der Schweiz aufgeklärt werden müssen. Dies bestätigte nachträglich die 1988 geäußerten Ansichten des Bundesrates bzw. der ihn beratenden Institutionen, wonach es fraglich ist, ob im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz überhaupt ein ausreichend großer geeigneter Gesteinskomplex nachgewiesen werden kann. Der Bundesrat verpflichtete deshalb die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke, d. h. die Eigentümer der NAGRA, die Untersuchungen zur Endlagerung der hoch- und mittelradioaktiven Abfälle auf Sedimentgesteine und andere Regionen auszudehnen (siehe BFE 2008).

Im Rahmen des durch den Bundesratsbeschluss initiierten Sediment-Untersuchungsprogramms (1988 bis 2000) erfolgte ein Evaluierungsverfahren für das gesamte Gebiet der Schweiz zur Wahl möglicher toniger Wirtsgesteine und Standortgebiete (NAGRA 1988, 1991, 1994c). Nach Auswertung der bereits vorliegenden geowissenschaftlichen Daten zur regionalen Verbreitung und Ausbildung der tonigen Sedimente fokussierten sich die Untersuchungen auf die tonreichen Gesteinsformationen Opalinuston und Untere Süßwassermolasse (Abb. 45). Als Grundlage für den Standortentscheidungsprozeß wurden zur Vervollständigung der Datenbasis Felduntersuchungen im Opalinuston, insbesondere eine 2D-Seismik-Kampagne (1991/1992), und Datenkompilationen zur Unteren Süßwassermolasse durchgeführt.

Im Konsens mit den Schweizer Bundesbehörden wurde 1994 von der NAGRA der Opalinuston als prioritäre Wirtsgesteinsoption festgelegt. Die wesentlichsten Gründe für die Auswahl des Opalinustones waren:

- relativ homogene lithologisch-mineralogisch-geochemische Zusammensetzung und einfacher struktureller Bau des Wirtsgesteins
- gute räumliche Prognostizierbarkeit und große laterale Ausdehnung,
- geringer Explorationsaufwand,
- Diffusion als maßgebender Transportprozess (Advektion spielt keine oder nur eine untergeordnete Rolle),
- geringe Porosität und Durchlässigkeit des Gesteins (Störungszonen bilden im Opalinuston keine bevorzugten Fliesspfade, was durch eine effiziente Selbstabdichtung erklärt wird),
- stabile reduzierende geochemische Bedingungen sowie
- Vorhandensein weiterer geologischer Barrieren in den Neben- bzw. Deckschichten in Form von gering durchlässigen tonigen oder evaporitischen Sedimenten.

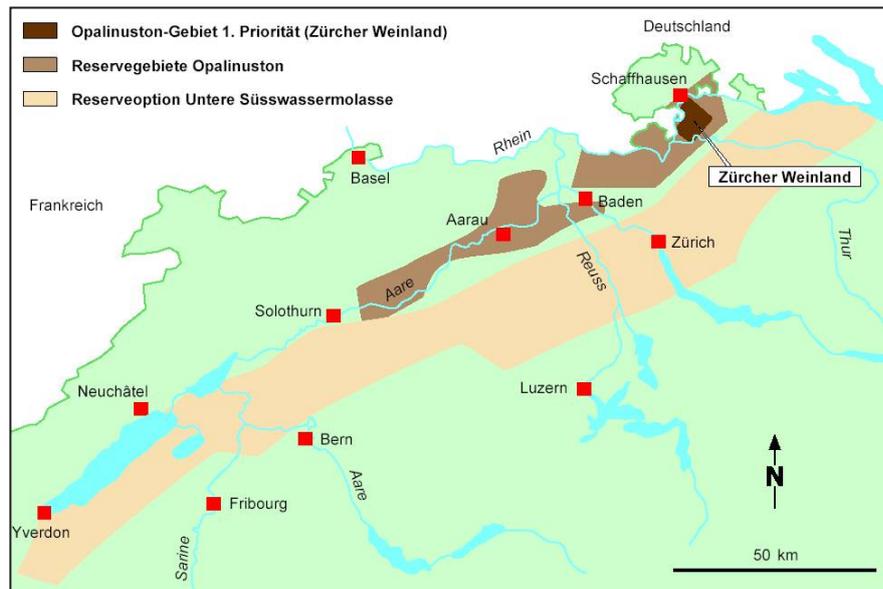


Abb. 45: Verbreitung des Opalinustons und der Unteren Süßwassermolasse in der Schweiz (NAGRA 2005)

Parallel dazu wurde das Gebiet des Zürcher Weinlandes (Abb. 45) für vertiefende Untersuchungen ausgewählt (siehe BFE 2008). Die Auswahl der Untersuchungsregion Zürcher Weinland erfolgte auf der Grundlage der nachfolgend, z. T. zusätzlich zur obigen Aufzählung genannten Kriterien:

- Tiefenlage zwischen 400 m und 1000 m,
- Mächtigkeit mindestens 100 m,
- subhorizontale Lagerung der Tonsteine,
- tektonisch ungestörte Lage und keine Anzeichen von neotektonischen Aktivitäten,
- geringe Hebungsgeschwindigkeit und niedrige natürliche Spannungsbeträge,
- geringer Temperaturgradient sowie
- Überdeckung durch schwach durchlässige Schichten, die eine zusätzliche geologische Barriere darstellen.

Ergänzend zu diesen Standortuntersuchungen wurden ab 1994 im Felslabor Mont Terri (Kanton Jura, NW Schweiz, ca. 5 km N St. Ursanne) umfangreiche In-situ-Untersuchungen vorgenommen, um die Eigenschaften der tonigen Wirtsgesteine detaillierter zu analysieren (Abb. 47, BOSSART et al. 2008). Das Felslabor befindet sich neben dem Mont-Terri-Strassentunnel in einem schluffig-sandigen Tonstein (Opalinuston), der dem Faltenjura zugeordnet wird und etwa 250 bis 320 m unterhalb der Erdoberfläche liegt (Abb. 46). Die Tonschichten fallen mit etwa 45° nach SE ein und weisen zahlreiche Faltungen und Störungszonen auf. Infolge der ungünstigen geologischen Bedingungen (komplizierte Struktur des Faltenjura) ist der Standort zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ungeeignet. Die Forschungsarbeiten im Felslabor finden unter internationaler Beteiligung statt (siehe HAMMER et al. 2009).

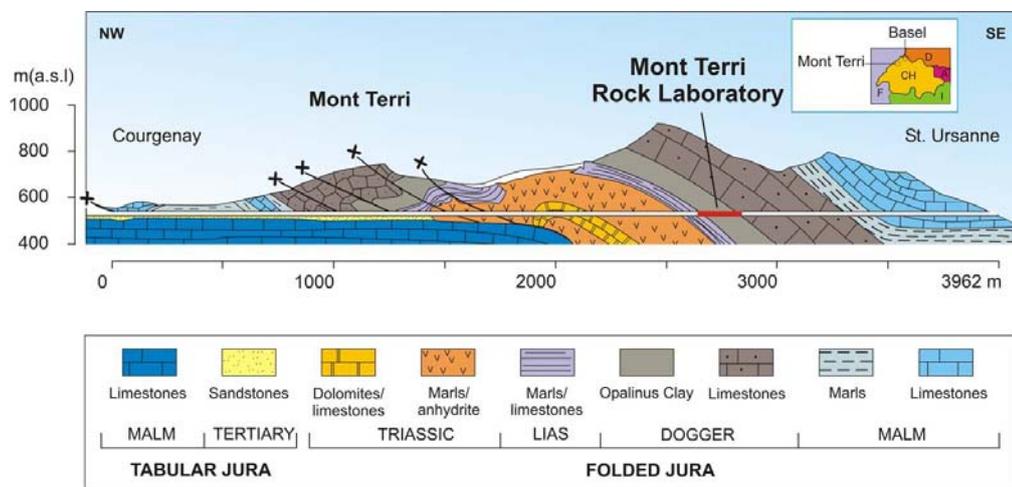


Abb. 46: Schematischer geologischer Schnitt durch den Mont Terri, mit Angaben zur Lage des URL Mont Terri

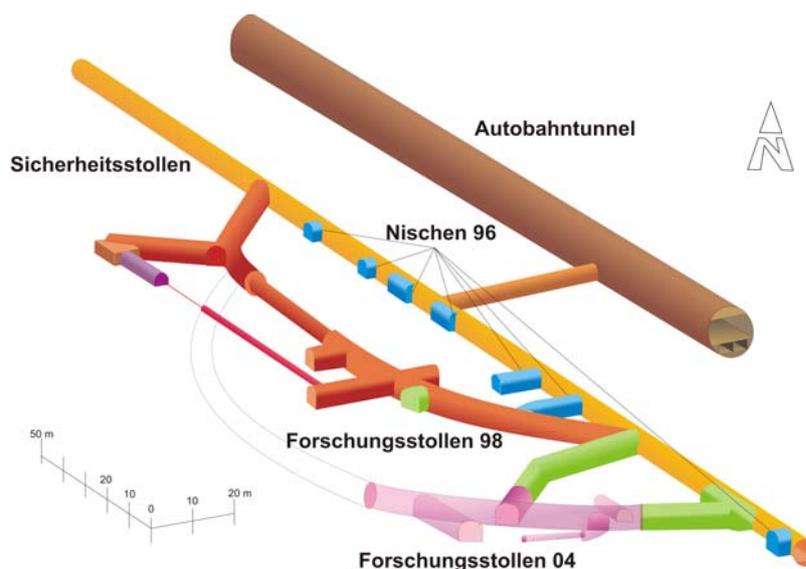


Abb. 47: Aufbau und Lage der Versuchsorte im Schweizer Mont-Terri-Felslabor

Die 1996 vom Bundesrat erteilte Bewilligung von Erkundungsarbeiten im Zürcher Weinland erlaubte der NAGRA lediglich die Durchführung der beantragten Untersuchungen. Sie entschied nicht über den Standort eines künftigen Tiefenlagers und erzeugte explizit keinen Rechtsanspruch auf weitere Bewilligungen für die Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle an diesem Standort. Nach Inkrafttreten der zusätzlich erforderlichen kantonalen Bewilligungen wurde in den Jahren 1998/1999 im Rahmen des Projektes „Opalinuston“ die ca. 1000 m tiefe Sondierbohrung Benken niedergebracht (NAGRA 2001b). Die Bohrung diente zur Kalibrierung (Tiefenwandlung) der oberflächlich durchgeführten Seismik-Messungen und zur detaillierten Charakterisierung der Gesteinseigenschaften. In der Bohrung werden seither hydraulische Langzeitmessungen durchgeführt. Parallel dazu hat die NAGRA 1997 auf einer Fläche von ca. 50 km² dreidimensionale reflexionsseismische Messungen (3D-Seismik) durchgeführt. Die Ergebnisse der Felduntersuchungen wurden 2001 der Öffentlichkeit präsentiert (NAGRA 2001c).

Die Synthese der im Rahmen des Projektes „Opalinuston“ erzielten geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse (NAGRA 2002a) aus den Standorterkundungen im Zürcher Weinland und den wissenschaftlichen Versuchen im Felslabor Mont Terri ist eine der Grundlagen für den 2002 von der NAGRA vorgelegten Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Machbarkeitsstudie für die Tiefenlagerung in der Schweiz, NAGRA 2002b). Die zuständigen Behörden und Kommissionen haben das eingereichte Projekt überprüft und den Entsorgungsnachweis als erbracht beurteilt. Der Entsorgungsnachweis beinhaltet allerdings keine Standortauswahl, sondern belegt lediglich die grundsätzliche Machbarkeit der Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle im Opalinuston des Zürcher Weinlandes. Die sicherheitstechnisch-geologische Bewertung der möglichen Wirtsgesteine und Gebiete wird im NTB 05-02 (NAGRA 2005) zusammengefasst.

Trotz dieses positiven Votums für die Standortregion Zürcher Weinland und den Opalinuston wurde im Rahmen des vom Bundesrat geforderten „Sachplanes geologische Tiefenlager“ (HSK 2007) ein neues dreistufiges Auswahlverfahren zur Findung von Endlagerstandorten (das aktuelle Entsorgungskonzept der Schweiz sieht zwei Endlager für hochaktive bzw. schwach-/mittelaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen vor, die aber auch am selben Standort erstellt werden können) in der Schweiz festgelegt (HSK 2007, BFE 2008). Auf der Grundlage des „Sachplanes geologische Tiefenlager“ soll ein neues, breit akzeptiertes Standortauswahlverfahren für das gesamte Gebiet der Schweiz unter Leitung des Bundesamtes für Energie (BFE) sowie bei Beteiligung der Kantone und der Öffentlichkeit durchgeführt werden. Der „Sachplan geologische Tiefenlager“ regelt im Detail:

- die Kriterien für die Auswahl von „geologischen Tiefenlagern“,
- das Verfahren, das bei einer Auswahl von mehreren Standortregionen schließlich zu einem Standort führt und

- die Vorgehensweise, wie behördenverbindlich die Regionen und letztlich die Standorte für die Tiefenlager festgelegt werden.

Die gesetzlichen Grundlagen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz sind im Kernenergiegesetz (KEG 2003) und in der Kernenergieverordnung (KEV 2004) geregelt, die beide am 1. Februar 2005 in Kraft getreten sind. Darin ist vorgeschrieben, dass Ziele und Vorgaben für die Lagerung sowie das Standortauswahlverfahren in einem Sachplan zu regeln sind. Verschiedene ergänzende Richtlinien (HSK 1993) sowie die gesetzliche Festlegung von Schutzziele sorgen zusätzlich für die Rahmenbedingungen einer sicheren Entsorgung.

Am 02.04.2008 genehmigte der schweizerische Bundesrat den „Sachplan geologische Tiefenlager“ und gab damit den Startschuss für eine Standortauswahl in drei Etappen, die insgesamt etwa 10 Jahre in Anspruch nehmen sollen:

- Identifizierung von potenziell geeigneten Endlager-Standortgebieten für die hoch- und die schwach-/mittelradioaktiven Abfälle aufgrund von sicherheitstechnischen und geologischen Kriterien,
- Auswahl von jeweils mindestens zwei Standorten für die beiden Endlager nach Abwägung der sozioökonomischen und raumplanerischen Auswirkungen und nach sicherheitstechnischem Vergleich der Standorte (inklusive Abfrage der Zustimmung der Standortgemeinden),
- Standortwahl nach vertiefender Untersuchung und Einleitung des Rahmenbewilligungsverfahrens für das HAA- und das SMA-Lager.

Die Anwendung des „Sachplanes geologisches Tiefenlager“ sieht zur Erreichung der Ziele der ersten Etappe ein 5-stufiges Einengungsverfahren vor (Abb. 48), das ausführlich in NAGRA (2008a-c) beschrieben ist und das in den Schritten 3 bis 5 insgesamt 13 Kriterien erfüllen muss (Abb. 22).

Dieses Einengungsverfahren beinhaltet in einem ersten Schritt die Auswahl von Gebieten anhand von Mindestanforderungen. Die verbliebenen Gebiete werden dann mit präziseren sicherheitsgerichteten Anforderungen weiter eingeeengt und mit einer 4-stufigen Skala (sehr günstig, günstig, bedingt günstig und ungünstig) bewertet. Durch Anwendung dieses Verfahrens wurden 3 Gebiete vorgeschlagen und beurteilt, die sowohl für ein HAW- wie auch für ein HAW/SMA-Kombilager geeignet sind:

- Zürcher Weinland (Opalinuston) - sehr geeignet,
- Bözberg (Opalinuston) - sehr geeignet,
- Nördlich Lägeren (Opalinuston) - geeignet.

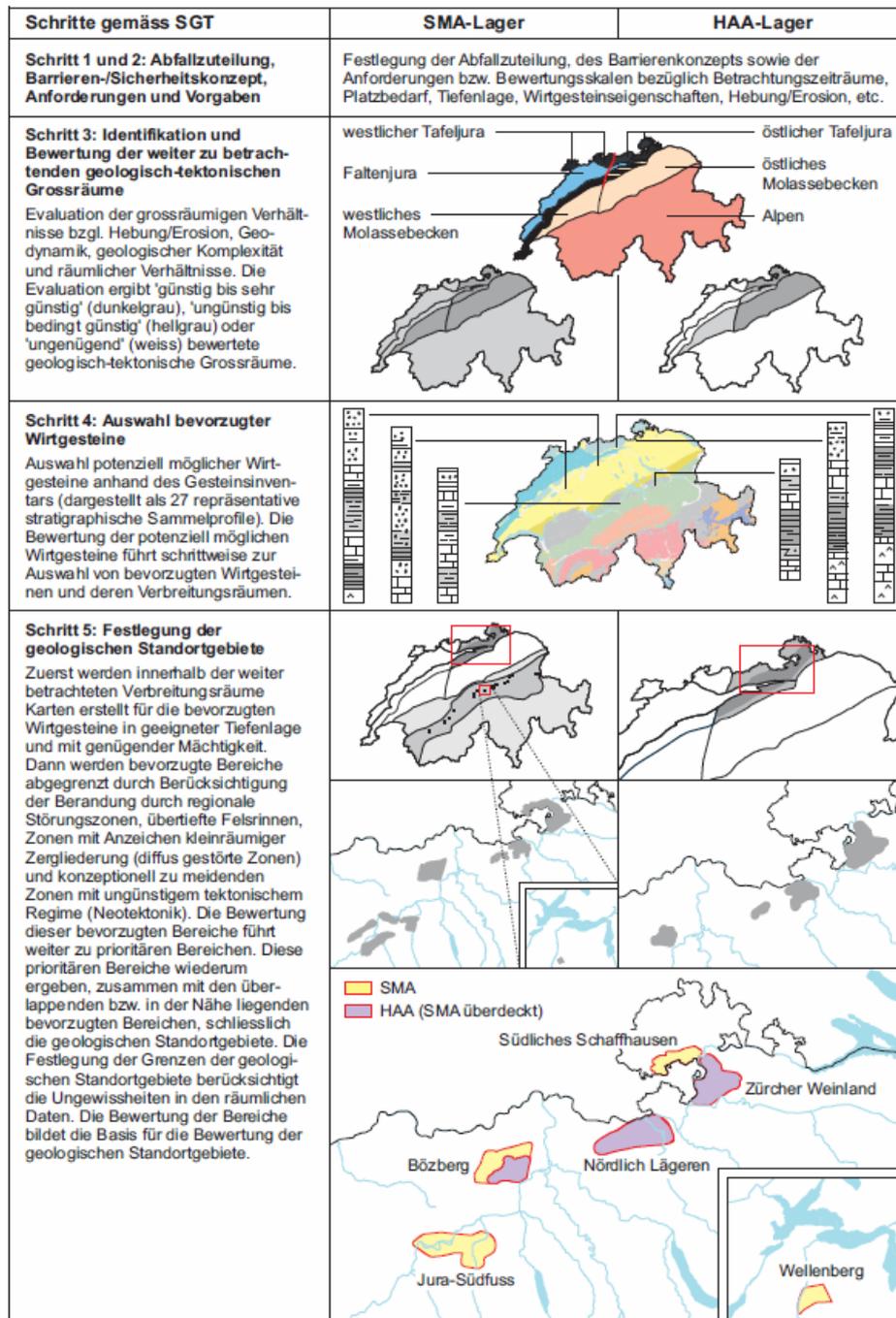


Abb. 48: Auswahl von geologischen Standortgebieten für die Errichtung eines HAW-Endlagers in der Schweiz (Schritte gemäß SGT, Etappe 1, NAGRA 2008a)

In Etappe 2 werden diese Gebiete unter Beteiligung der Standortregionen durch übertägige geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen, unter Einschluss von Tiefbohrungen, evaluiert. Anschließend werden vom Schweizer Bundesrat je zwei Standorte (getrennt für HAW und schwach- bzw. mittelaktive Abfälle) ausgewählt, die in Etappe 3 dann vertieft untersucht werden. Die für diese jeweils zwei Standorte vorgesehenen untertägigen Erkundungsarbeiten werden nach derzeitigen Planungen nicht

vor 2020 beginnen. Abschließend soll die Baugenehmigung vom Schweizer Bundesrat erteilt und vom Parlament genehmigt werden.

Entsprechend den im „Sachplan geologische Tiefenlager“ enthaltenen Vorgaben für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen wird in den gesetzlichen Grundlagen auch geregelt, wie unter Beteiligung der verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen ein Auswahlverfahren zur Standortsuche durchgeführt werden muss. In der aktuellen Planung ist die Inbetriebnahme eines Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle ab 2030 und für hochaktive Abfälle ab 2040 vorgesehen. Ähnlich wie in Frankreich soll erst ein „Pilotendlager“, bestehend aus zwei kurzen Einlagerungsstrecken und einer Kontrollstrecke, errichtet werden, das dann bei Erfüllung der Langzeitsicherheitsauflagen in das Endlager überführt werden kann.

4.5 Deutschland

Nach dem „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“ (Atomgesetz; AtG 1959) hat der Bund die Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland einzurichten. Für den Bau und den Betrieb dieser Anlagen ist nach dem AtG das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zuständig.

In Deutschland hat man sich bereits Mitte der 1950er Jahre angesichts der sich aus der zivilen Kernenergienutzung, z. B. im Rahmen von medizinischen Anwendungen oder naturwissenschaftlichen Forschungsarbeiten, sowie der sich abzeichnenden Errichtung von Kernkraftwerken (z. B. 1961 Versuchskernkraftwerk Kahl, 1966 Kernkraftwerk Gundremmingen) aus Verantwortung für die Umwelt mit Überlegungen zur Entsorgung der dabei entstehenden Abfälle beschäftigt. Dabei stützte man sich u. a. auf die in den USA diesbezüglich gemachten Erfahrungen, wo bereits 1955 an der National Academy of Science ein „Committee on waste disposal“ geschaffen wurde, das auf der Genfer UN-Konferenz zur friedlichen Nutzung der Kernenergie Salzformationen zur Lagerung von hochradioaktiven Abfällen vorschlug (THEIS 1956). In den Folgejahren wurde die Idee der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen weiter ausgebaut und intensiv erforscht. Seit 1959 wurden vom Oak Ridge National Laboratory (ORNL) umfangreiche Forschungsprogramme zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salzbergwerken initiiert (z. B. BLOMEKE et al. 1963, STRUXNESS 1963, BRADSHAW et al. 1963).

Bei der Suche nach geeigneten geologischen Formationen in Deutschland empfahl 1959 die Bundesanstalt für Bodenforschung, bis 1975 Vorgängerinstitution der BGR, auf einer, speziell dieser Thematik gewidmeten UN-Tagung Salzformationen zur Lagerung schwach- und mittelaktiver (in Kavernen) sowie hochaktiver Abfälle (kontrollierte Lagerung in Bergwerken, WAGER & RICHTER 1960). Gründe für diese Empfehlung, das geplante Endlager in einer Salzstruktur zu errichten, waren:

- die bis Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreichenden umfangreichen deutschen (und internationalen) Erfahrungen in Salz-Exploration und -Bergbau,
- die Ergebnisse von Forschungsarbeiten im Salz, die seit Ende der 1950er Jahre insbesondere in den USA durchgeführt wurden,
- das Vorhandensein vieler Salzstöcke (und damit Standortalternativen) in Deutschland, vor allem in Norddeutschland, sowie
- günstige Wirtsgesteinseigenschaften des Steinsalzes (z. B. praktisch wasserfrei, gute Wärmeleitfähigkeit, ausführlicher siehe Kap. 2).

Auf der Grundlage dieser Ausarbeitungen sprach sich am 7.07.1961, also noch lange bevor die IAEA derartige Empfehlungen publizierte, die Deutsche Atomkommission (DAK) für die Endlagerung in Salzlagerstätten des tieferen Untergrundes aus (DAK 1961). Parallel dazu wurde zu Forschungszwecken der Bau einer Prototypkaverne zur Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle beschlossen. Außerdem wurden Forschungsarbeiten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Salzkavernen im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der Gesellschaft für Atomtechnik, Karlsruhe, der Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) und EURATOM initiiert. 1963 wurden im „Deutschen Atomprogramm I“ Untersuchungen über geeignete geologische Formationen für die unterirdische Lagerung radioaktiver Abfälle in Salzstrukturen als vordringliche Forschungs- und Entwicklungsaufgabe gefordert. Im Mai 1963 legte die Bundesanstalt für Bodenforschung einen Bericht vor, der die besondere Eignung von Salzformationen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle unterstrichen hat und eine erste Bestandsaufnahme der Salzstrukturen im Untergrund der BRD (Schwerpunkte Norddeutschland und Niederrheinische Bucht) zwecks Errichtung von Kavernen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle enthielt (MARTINI 1963). In der Studie wurden jeweils drei prinzipiell mögliche Standorte mit feinsandigen Wirtsgesteinen (Rautenberg, ca. 6 km NE Hildesheim; Scheibenhardt, SW Karlsruhe und Maisach, NW München) bzw. mit Salzstöcken (Asse II, bei Wolfenbüttel; Klein Kühren, ca. 75 km SE Hamburg und Geesthacht, ca. 20 km SE Hamburg) betrachtet, jedoch ohne speziell dafür durchgeführte Erkundungsarbeiten und ohne eine detaillierte, kriteriengestützte Bewertung der Standorte.

Die Arbeiten zur Vorauswahl möglicher Salzstrukturen wurden intensiviert und bereits 1964 benannte die Bundesanstalt für Bodenforschung auf Erlass des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung (BMWF) vom 12.12.1963 Salzstrukturen, die zur Aussolung von Kavernen zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet erschienen (RICHTER-BERNBURG & HOFRICHTER 1964). Für die Auswahl der Salzvorkommen und für die vergleichende Bewertung ihrer Eignung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden folgende Kriterien genutzt:

- hinreichende Mächtigkeit (bei einer angenommenen Höhe der Speicherkavernen von 100 m sollte die Salzformation mindestens 400 – 500 m mächtig sein, um genügende Salzmächtigkeiten im Hangenden und Liegenden zu gewährleisten),
- „einigermaßen“ homogen zusammengesetztes, zur Aussohlung geeignetes Steinsalz, möglichst ohne mächtige Einschaltungen von Carnallit- oder Anhydritgestein,
- ausreichende Größe des Salzkörpers, damit der notwendige horizontale Abstand zum Nebengestein gewährleistet ist, Lage der Oberfläche des Salzkörpers zwischen 300 und 800 m unter Flur, damit neben der Sicherheit auch die Wirtschaftlichkeit (z. B. Bohrkosten, Pumpkosten für Solprozess) gewahrt bleibt,
- Überlagerung des Salzgesteins durch möglichst wenig permeables Deckgebirge zwecks Senkung des Aufwandes zur Einbindung der Verrohrung von Bohrlöchern,
- Möglichkeit zur Entsorgung der bei der Solung anfallenden Salzwässer (naher Vorfluter),
- gute Verkehrslage sowie
- Nachbarschaft zu geplanten Reaktorstandorten.

Detaillierter bewertet wurden 7 Salzstrukturen, wobei neben den norddeutschen Salzstöcken Heide (Holstein), Geesthacht (20 km SE Hamburg), Harsefeld (12 km W Buxtehude), Bunde/Jemgum (Ostfriesland, an der Ems) und Bremen-Lesum auch die flach lagernden Salzvorkommen Krummendeich (Untere Elbe, gegenüber Brunsbüttelkoog) und Leutesheim (80 km SSW Karlsruhe) betrachtet wurden. Da zusätzliche geologische Untersuchungen im Rahmen dieser Studie nicht erfolgten, ist die vorgenommene Auswahl eher zufällig und nicht auf systematische Bewertungen aller im Untergrund Deutschlands vorkommenden Salzlagerstätten zurückzuführen. Alle näher bewerteten Salzstrukturen wiesen relativ geringe Entfernungen zu geplanten Kernkraftwerken auf (Abb. 49). Unter den analysierten Salzstrukturen wurden Krummendeich und Bunde/Jemgum als besonders geeignet eingestuft, dagegen erhielt Leutesheim aufgrund der erhöhten Erdbebengefährdung des Umfeldes eine negative Einschätzung.

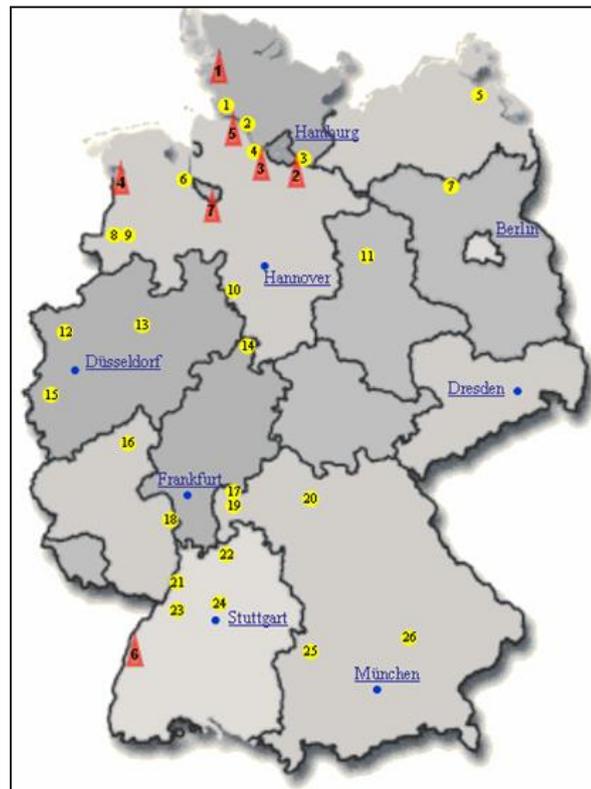


Abb. 49: Lage der von RICHTER-BERNBURG & HOFRICHTER (1964) vorgeschlagenen potenziellen Endlagerstandorte in Salzstrukturen (1 – Heide, 2 – Geesthacht, 3 – Harsefeld, 4 – Bunde/Jemgum, 5 – Krummendeich, 6 – Bremen-Lesum; gelbe Kreise – Standorte Kernreaktoren)

Als erster Schritt zur Errichtung eines Endlagers sollte eine Protokaverne in einem der am besten bewerteten Salzstöcke gesolt und in ihr Versuche zur Endlagerung durchgeführt werden. Der für den Bau der „Protokaverne“ im Ergebnis der Studie der Bundesanstalt für Bodenforschung ausgewählte Standort Bunde/Jemgum wurde 1966 wegen Problemen beim Grundstückskauf, Widerstandes in der Region und Ablehnung durch den Kreistag aufgegeben. Die Errichtung einer „Protokaverne“ wurde schließlich in der Schachanlage Asse II (bei Wolfenbüttel) realisiert, die 1965 von der Bundesregierung für die Durchführung von Endlager-relevanten In-situ-Untersuchungen gekauft und der GSF als Forschungsbergwerk zur Betriebsführung übergeben wurde. 1967 erfolgte dort der Beginn des Versuchsprogramms zur Einlagerung niedrigaktiver Abfälle und bis 1978 wurden auf der Asse schwach- und mittelradioaktive Abfälle zu Versuchszwecken eingelagert.

Durch vielfältige Erfahrungen und wissenschaftliche Erkenntnisse überwog Mitte der 1960er Jahre in Deutschland die Meinung, dass in Salzstöcken flüssige und feste Industrieabfälle gefahrlos gelagert werden können (RICHTER-BERNBURG 1966). Auch das Fazit der 1966 in Essen durchgeführten Tagung „Endbeseitigung und Tieflagerung radioaktiver Rückstände“ unterstrich, dass sowohl niedrig- als auch hochradioaktive Abfälle

in Deutschland vorzugsweise in Salzformationen des tieferen Untergrundes eingelagert werden sollten (HOFRICHTER 1966).

Zu Beginn der 1970er Jahre, also früher als in den meisten anderen Industrienationen der Welt, wurden zwecks Auswahl eines Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle zuerst vom Bund und dann vom Land Niedersachsen Standortauswahlverfahren durchgeführt. Die Auseinandersetzung Niedersachsens mit dieser Thematik ging auf zahlreiche Gutachten der 1960er Jahre zurück, die Niedersachsen als das aus geologischer und raumordnerischer Sicht am besten geeignete Bundesland ausgewiesen haben. Basierend auf diesen Expertenmeinungen und angesichts der wirtschaftlichen Bedeutung eines solchen Projekts gab der damalige niedersächsische Ministerpräsident A. Kubel (SPD) bereits im Winter 1973/74 der Bundesregierung die Zusage, dass das vom Bund verfolgte Konzept eines „Integrierten Nuklearen Entsorgungszentrums“ (NEZ) in Niedersachsen realisiert werden kann. Diese Entscheidung wurde in der Folgezeit auch durch CDU-geführte Landesregierungen getragen bzw. forciert. Vor diesem Hintergrund hat sich dann das Land, auf dessen Gebiet das NEZ errichtet werden sollte (das demzufolge die Anlage genehmigen muss) und das von den Auswirkungen der Errichtung dieser Anlagen vor allem betroffen ist, parallel und weitestgehend unabhängig vom Bund mit dieser Problematik beschäftigt.

In Deutschland erfolgte vor Beginn der eigentlichen Auswahlprozedur die Festlegung von Rahmenbedingungen bzw. Auswahlkriterien, die durch Experten im Ergebnis mehrjähriger Auseinandersetzungen mit der Thematik vorgeschlagen wurden. Im Vergleich mit den Standortsuchverfahren in anderen Ländern weist das Auswahlverfahren in Deutschland die Besonderheit auf, dass die durch den Bund veranlasste Standortsuche für ein Endlager Anfang der 1970er Jahre integraler Bestandteil der Suche nach einem geeigneten Standort für ein Nukleares Entsorgungszentrum war. Trotzdem entsprechen die Anfang der 1970er Jahre der Standortauswahl in Deutschland zugrunde gelegten Auswahlkriterien zum größten Teil den auch heute noch, nach über 30 Jahren internationaler Endlagerforschung relevanten Standortanforderungen (siehe Kap. 3).

4.5.1 Standortauswahlverfahren des Bundes (1973 – 1976)

Der Auftrag zur Auswahl eines Standortes für ein integriertes Entsorgungszentrum, an dem neben der Wiederaufarbeitung und Konditionierung der radioaktiven Abfälle auch ihre Endlagerung erfolgen sollte, wurde durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) im Jahre 1973 an die Firma „Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungsgesellschaft“ (KEWA) vergeben. Im Gesamtkonzept der Suche nach einem Standort für ein „Nukleares Entsorgungszentrum“ (NEZ) stellte das Endlager nur eine zusätzliche Option dar. Der Schwerpunkt des Suchverfahrens lag eindeutig auf der Auswahl eines Standortes, der einen möglichst umweltschonenden Betrieb der geplanten übertragigen

Wiederaufarbeitungs- und Konditionierungsanlage gewährleisten sollte. Folgerichtig waren auch die wichtigsten Kriterien für die Standortauswahl vor allem diesbezüglich ausgerichtet. Aus der Größe des geplanten NEZ und den möglichen Umweltauswirkungen der übertragenden Wiederaufarbeitungs- und Abfallbehandlungsanlagen resultierten einige Standortauswahlkriterien, wie z. B. meteorologische, Infrastruktur- und Wasserbedarfsanforderungen sowie sehr strenge Naturschutzauflagen, die für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen weitgehend irrelevant sind.

Ausgehend von der öffentlichen Kernenergie Diskussion Ende der 1960er/Anfang der 1970er Jahre bestand der an die KEWA vergebene Auftrag in der Suche nach einem „umwelt- und sicherheitstechnisch optimalen“ Standort mit „Endlagerpotenzial“. Die Beauftragung für die KEWA-Studie enthielt keine Vorgabe bezüglich des Endlager-Wirtsgesteinstyps. Im Rahmen der KEWA-Studie (1974) wurde ein aus 3 Phasen bestehendes Konzept für die Standortauswahl für ein Nukleares Entsorgungszentrum entwickelt und auf das gesamte Gebiet der damaligen BRD angewendet:

- Phase 1 - Großraumuntersuchungen, wobei die kleinste Gebietseinheit einem Landkreis entsprach,
- Phase 2 - Regionaluntersuchungen und Standort-Zwischenbewertungen zur Reduzierung der Anzahl der möglichen Standorte,
- Phase 3 - Detailuntersuchungen mehrerer möglicher Standorte, um eine Reihenfolge der untersuchungswürdigsten Standorte festlegen zu können.

Die im Verlaufe der Großraum- und Regionaluntersuchungen (Phasen 1 und 2) berücksichtigten Daten zu z. B. raumordnerischen, geologischen und hydrologischen Aspekten wurden aus bereits vorhandenen bzw. speziell dafür erarbeiteten Datenzusammenstellungen (z. B. Planungsatlanten, gewässerkundliche Jahresberichte, topographische Karten und Karten der Erholungsgebiete der Bundesländer) entnommen, während für die in Phase 3 durchzuführenden Bewertungen Gutachten an Fachinstitute bzw. Fachfirmen (LÜTTIG & WAGER 1974, KBB 1974) vergeben wurden. Neben diesen speziellen Gutachten sind die kleinmaßstäbigen (1:1000000) Boden- und geologischen Karten der Bundesrepublik Deutschland sowie die von der Bundesanstalt für Bodenforschung publizierten Kartenwerke und Abhandlungen zu den Salzstrukturen NW-Deutschlands und ihrer Tiefenlage bzw. zu ihrer Entstehung (z. B. JARITZ 1972, 1973) in den Standortauswahlprozess eingeflossen. Spezielle, auf die Erhebung zusätzlicher Parameter ausgerichtete Standortuntersuchungen, wie z. B. geophysikalische Oberflächenmessungen, Erkundungsbohrungen oder hydrogeologische Studien wurden in Phase 3 dieses Standortsuchverfahrens lediglich an den drei am besten bewerteten Standorten geplant, aber, wie nachfolgend beschrieben, nur zu einem geringen Teil durchgeführt.

Im Verlaufe der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens (Großraumuntersuchungen) wurden anhand der raumordnerischen Kriterien:

- dünn besiedelte Region,
- Ausschluss von Naturschutzgebieten oder Erholungsräumen sowie
- keine bedeutende Milchproduktion

alle bundesdeutschen Landkreise durchmustert. Als Flächenbedarf für ein Nukleares Entsorgungszentrum wurden ca. 6 km² in einem völlig siedlungsfreien Raum angenommen. Ausgehend von diesen Auswahlkriterien erfolgte in der Anfangsphase der KEWA-Untersuchungen die Standortvorauswahl unabhängig von den in der Tiefe anzutreffenden Gesteinstypen, d. h. das Vorkommen von für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeigneten Gesteinsformationen war in dieser Phase der Standortauswahl unwichtig. Grund dafür war, dass kein raumordnerisch geeigneter Standort ausgeschlossen werden sollte, nur weil er über kein Endlagerpotenzial verfügt. Erst in späteren Phasen des Auswahlprozesses des Bundes wurden allgemeine geologische Kriterien, wie Vulkanismus sowie Häufigkeit und Intensität seismischer Ereignisse detaillierter betrachtet.

In der frühen Phase der Standortsuche wurde vom Institut für Raumordnung, einer Vorgängereinstitution der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung bzw. des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR, seit 1998), eine Karte der Bundesrepublik Deutschland erstellt (Anlage 1 des KEWA-Berichts, publiziert in BfS 2005). In dieser Karte wurden Kurzerholungsgebiete (Naherholung einschließlich Wochenenderholung), Ferienerholungsgebiete, bestehende Naturparks, Naturparks gleichzusetzende Gebiete in Baden-Württemberg und geplante Naturparks ausgewiesen und vom weiteren Verfahren ausgeschlossen. Gebiete, die die oben genannten Standortrandbedingungen erfüllten, wurden anschließend einer detaillierten Bewertung unterzogen. Dabei wurden folgende Kriterien betrachtet:

a. Ausschlusskriterien:

- Ausschluss von Erdbebengebieten,
- Ausschluss von Flugschneisen,
- Ausschluss von Trinkwassereinzugsgebieten und
- Ausschluss von Naturschutz-, Erholungs- und Fremdenverkehrsgebieten.

- b. Bevölkerungsdichte (Gebiete mit möglichst geringer Bevölkerungsdichte, wobei der Nahbereich bis 15 km Radius völlig siedlungsfrei sein sollte),
- c. günstige meteorologische Verhältnisse, wobei vor allem berücksichtigt wurden: Windrichtungsverteilung, Hauptwindrichtung und Häufigkeit ungünstiger meteorologischer Ausbreitungsbedingungen (bezüglich Abgasen aus Wiederaufarbeitung und Konditionierung),
- d. Wirtschaftsfaktoren:
 - günstige Infrastruktur (Entfernung zum nächsten Grund- bzw. Mittelzentrum sowie zur nächsten elektrischen Umschaltstation und Zugehörigkeit zu Gebieten, in denen Wirtschaftsfördermaßnahmen der öffentlichen Hand vorgesehen sind),
 - Umfang der Milch- bzw. Viehwirtschaft,
 - Einstufung des Gebietes als Natur-, Erholungs- und Fremdenverkehrsgebiet,
 - ausreichende Energie- und Wasserversorgung sowie
 - günstige Verkehrsanbindung,
- e. geologische Kriterien:
 - Möglichkeit zur Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle,
 - Baugrundbeschaffenheit,
 - Vorhandensein von Stauhorizonten als natürliche Sicherheitsbarrieren gegen Boden- und Grundwasserkontamination im Störfall,
 - Auftreten eines einheitlichen oder mehrschichtigen Grundwasserkörpers,
 - Lage der Grundwasseroberfläche,
 - Grundwasserfließrichtung sowie
 - Grundwasserergiebigkeit und –qualität,
- f. allgemeine Kriterien:
 - Entfernung zur nächsten Staatsgrenze,
 - Entfernung zur nächsten kerntechnischen Anlage und
 - erforderliche Umsiedlungsmaßnahmen im vorgesehenen Standortgelände.

Als Ergebnis dieses bundesweiten Auswahlprozesses wurden 26 mögliche Standorte, verteilt auf fast alle Bundesländer ermittelt, wobei bewusst auch einzelne Standorte in Naturschutz- und Erholungsgebieten oder ohne „Endlagerpotenzial“ (in dieser Phase bedeutete dies bereits: Standorte ohne Salzstöcke) ausgewählt wurden, um bei näheren Untersuchungen die spezifischen Eigenschaften dieser Standorte mitzudiskutieren. Große Teile des Bundesgebietes schieden allerdings aufgrund ihrer Bevölkerungsdichte, der intensiven Milchwirtschaft oder aus Naturschutzgründen aus. Neben raumordnerischen Gründen führten insbesondere fehlende Möglichkeiten der Verpressung Tritium-haltiger Abwässer aus der Wiederaufarbeitung zum Ausscheiden vieler Regionen.

Ziel der zweiten Phase des Standortauswahlverfahrens des Bundes (Regionaluntersuchungen und Standort-Zwischenbewertung) war es, unter Zugrundelegung von möglichst umfangreichen Standort-bezogenen Daten sowie von leicht im Vergleich zur ersten Auswahlphase modifizierten, entsprechend ihrer Bedeutung gewichteten Bewertungskriterien die Anzahl möglicher Standorte für die Detailuntersuchungen einzugrenzen. Die zur Anwendung gebrachten Kriterien wurden in wichtig bzw. teils wichtig sowie teils sehr wichtig untergliedert. Als sehr wichtige Kriterien für die Standortauswahl wurden eingestuft:

- Bevölkerungsdichte im Bereich 5 bis 30 km um den Standort,
- Milchwirtschaft im Nahbereich und
- Abflussrate des nächstgelegenen Flusses.

Das letztgenannte Kriterium unterstreicht, dass in dieser Phase des Auswahlprozesses die Endlagerung in einer Salzformation präferiert wurde (Ableitung der Salzsole aus der Aussolung einer Speicherkaverne). Teils wichtige, teils sehr wichtige Kriterien waren:

- Fremdenverkehr,
- erforderliche Umsiedlungsmaßnahmen,
- Vorhandensein von geologischem Endlagerpotenzial,
- Vorhandensein von Porenspeichern (zwecks Speicherung von Tritium-reichen Wässern aus der Wiederaufarbeitung),
- Entfernung zum nächsten DB-Anschluss und
- möglichst große Entfernung zu internationalen Großflughäfen.

Es wurden vier Wichtungsvarianten der Auswahlkriterien untersucht. Im Ergebnis der Anwendung der obengenannten Kriterien wurden folgende 10 Standorte ausgewählt, von denen sich die Mehrheit in unmittelbarer Nähe zu Salzlagerstätten befand (Abb. 50), d. h. in dieser Phase des Auswahlprozesses erlangte das Vorhandensein einer für die Endlagerung möglicherweise geeigneten Salzstruktur eine vorrangige Bedeutung:

1. Ahlden (ursprünglich Salzstock Eilte, der dann durch den Salzstock Lichtenhorst ersetzt wurde, Niedersachsen (Nds.),
2. Börger (Salzstock Wahn, Nds.),
3. Faßberg (erst Salzstock Dethlingen, dann Salzstock Weesen-Lutterloh, Nds.),
4. Friedrichskoog (Schleswig-Holstein, Küstenstandort),
5. Wiederaufarbeitungsanlage (WAK) Karlsruhe,
6. Lüttau (Salzstock Juliusburg, Ostholstein, grenznah zur DDR),
7. Uchte (dünne Besiedlung, nahe Loccum, Nds.),
8. Mahlberg (tertiäre Kalilagerstätten im Oberrheintal-Graben, Baden-Württemberg),
9. Sohlhöhe (Spessart, Bayern, Natur- und Erholungsgebiet) und
10. Oberwesel (südwestliches Rheinisches Schiefergebirge, Rheinland-Pfalz).

Die zumindest in der Anfangsphase der KEWA-Studie vorgenommene Beschränkung auf ausschließlich raumordnerische Kriterien hatte die Ausweisung von mehreren Standorten zur Folge, die aus geologischer Sicht völlig ungeeignet für eine langzeitsichere Endlagerung radioaktiver Abfälle sind (z. B. Oberwesel – klastische Wirtsgesteine; Lüttau – Salzstock zu tief; Mahlberg – erhöhte Erdbebengefahr).

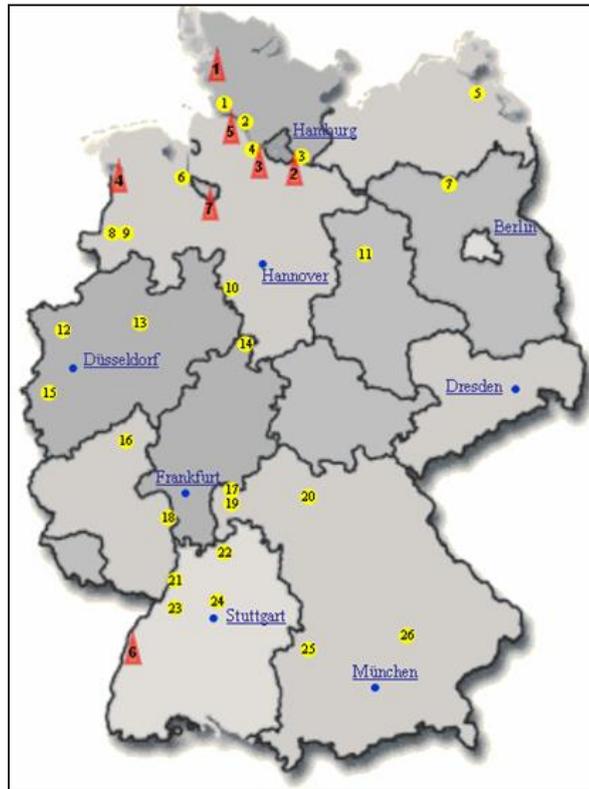


Abb. 50: Im Ergebnis der KEWA-I-Studie ausgewiesene potenzielle Endlagerstandorte in Deutschland (Nummerierung siehe Text, gelbe Kreise – Standorte von Kernreaktoren)

Anschließend erfolgten auf der Grundlage der bereits vorhandenen Daten Detailbewertungen der ausgewiesenen möglichen Standorte. Relativ schnell wurde deutlich, dass die Standorte Friedrichskoog (wegen der neu entstandenen Feriensiedlung und ungünstiger Besiedlungsstruktur) und WAK Karlsruhe (wegen der unmittelbaren Nähe zum Kernforschungszentrum und zur Stadt Karlsruhe) nicht weiter betrachtet wurden.

Die verbliebenen acht Standorte wurden in einem Gutachten von LÜTTIG & WAGER (1974) bezüglich ihrer hydrogeologischen und geologischen Rahmenbedingungen vergleichend bewertet. Die Beauftragung zu diesem Gutachten erfolgte durch die KEWA im Juli/August 1974. Auf der Grundlage von bereits vorhandenen Kenntnissen und Unterlagen sollten die Salzlagerstätten in der Nähe der vordergründig raumordnerisch ausgegliederten Standorte charakterisiert und gegenübergestellt werden. Parallel dazu wurden die Angaben zur Gebietsinfrastruktur überprüft und die bei den Voruntersuchungen verwendeten Angaben zur Geologie, Hydrologie und Meteorologie präzisiert bzw. erweitert. Zur Entscheidungsfindung wurden zu folgenden Themenkomplexen Detailinformationen zusammengestellt:

- hydrologische Gegebenheiten an der Oberfläche, insbesondere Angaben zu den fließenden Gewässern,

- Grundwasserverhältnisse am Standort und in der näheren Umgebung (geplante Grundwasserentnahme von 720 m³/h, was ca. 6 Mio. m³/a entspricht),
- Erdbebengefährdung,
- Baugrundbeschaffenheit,
- geologischer Aufbau in Oberflächennähe, insbesondere im Hinblick auf eventuell vorhandene Stauhorizonte,
- Möglichkeit der Anlage von Salzkavernen bzw. „geologisch sicherer Räume“ und
- Vorhandensein von Porenspeichern in Standortnähe (zwecks Einleitung Tritium-haltiger Wässer).

LÜTTIG & WAGER (1974) gingen bei der Erstellung der Studie davon aus, dass ein sicherer Abschluss der radioaktiven Abfälle im Steinsalz über sehr lange Zeiträume gewährleistet ist. Bei der kriteriengestützten Bewertung der 8 Standorte schnitten die norddeutschen Standorte besser als die süddeutschen ab, da sie erdbebensicherer, aus meteorologischer Sicht günstiger (Windverhältnisse) und geeigneter für die Anlage von Salzkavernen sind. Die Autoren wiesen mehrfach auf die unzureichende Datenlage (insbesondere zum inneren Aufbau der Salzstrukturen) für eine detaillierte Eignungsbewertung einzelner Salzlagerstätten für den Bau eines Endlagers und die Notwendigkeit ergänzender, vor allem geologischer Untersuchungen hin. Im Ergebnis der Anwendung der Bewertungskriterien wurde folgende Reihung der Standorte vorgenommen:

- Ahlden (Salzstock Lichtenhorst, an der Aller),
- Börger (Salzstock Wahn, Emsland),
- Faßberg (Salzstock Weesen-Lutterloh, Lüneburger Heide).

Die Gründe für den Ausschluss der anderen Standorte reichten von „zu unrein und zu geringmächtig“ (Uchte), über „zu tief“ (Lütau), bis zu „nur klastische Sedimente, kein naheliegendes Salz“ (Oberwesel, Sohlhöhe) und „hohe Erdbebengefährdung“ (Mahlberg).

In diese Phase des Auswahlprozesses flossen auch Detailinformationen einer durch die KEWA im Oktober 1974 in Auftrag gegebenen Studie der KBB GmbH, Hannover, zur Bewertung von norddeutschen Salzstöcken hinsichtlich ihres Erkundungsstandes und des Eignungsgrades für den Bau von Kavernen ein. Bei der Auftragsvergabe zu dieser Studie wurden durch die KEWA 6 Gebiete Norddeutschlands benannt, in denen folgende 17 Salzstöcke (unter Einschluss der 3 Standorte aus der LÜTTIG & WAGER-Studie) bewertet werden sollten:

- mittleres Emsland (zwischen Meppen und Papenburg): Salzstöcke Neusustrum, Oberlanger-Tenge, **Wahn** und Lathen,
- westliches Ostfriesland (Raum Aurich, Norden, Emden): Salzstöcke Westdorf, Süderneuland, Uttum, Groothusen und Emden,
- nördliches Schleswig-Holstein (östlich Flensburg): Salzstock Sterup,
- Zonenrandgebiet östlich Lüneburg: Salzstock Rosenthal,
- Lüneburger Heide: Salzstöcke **Weesen-Lutterloh** und Dethlingen sowie
- Raum Verden/Aller: Salzstöcke Verden, Eitzendorf, Rethem und **Lichtenhorst**.

Als Grundlagen für die Charakterisierung und Eignungsbewertung der Salzstöcke für den Kavernenbau wurden folgende Kriterien genutzt:

- Größe bzw. Längen- und Breitenerstreckung des Salzstockes,
- Tiefenlage der Salzstockoberkante,
- Informationen zur Zusammensetzung und zum Bau der Salzformationen,
- Deckgebirgsaufbau,
- Daten früherer Bohrungen bzw. geophysikalischer Untersuchungen,
- Nutzung des Salzstockes,
- große Bauvorhaben in der Nähe,
- Lage zum Wasser (Entnahme und Soleableitung)
- Topographie und
- Besiedlung.

Auch in dieser Studie wurde ein unzureichender Kenntnisstand zum inneren Bau der Salzstrukturen festgestellt und für fast alle Standorte ein zusätzlicher Untersuchungsbedarf definiert. Unter Berücksichtigung dieser Vorbehalte wurden die Salzstöcke Westdorf und Sterup als die am besten geeigneten Strukturen ausgewiesen. Die schlechtere Bewertung der anderen Salzstöcke basierte z. B. auf dem Vorhandensein stillgelegter Bergwerke (Rethem und Verden), ungenügenden Solebeseitigungsmöglichkeiten (Wahn und Lichtenhorst), zu großen Tiefen (Uttum und Emden) oder anderen Nutzungen der Salzstöcke (Groothusen – Kavernen).

Unter Zugrundelegung der Standortreihung aus dem Gutachten von LÜTTIG & WAGER (1974) stellte das BMFT 1975 acht Mio. Mark, verteilt auf drei Jahre, für detaillierte Untersuchungen der Salzstöcke Wahn, Lichtenhorst und Lutterloh zur Verfügung. Am Standort Wahn wurden 1975 geoelektrische Messungen und 16 Flachbohrungen realisiert. Weitere Arbeiten (z. B. Tiefbohrung) mussten infolge von Formfehlern beim Vertragsabschluss mit der Grundstückbesitzerin und aufgrund von Vor-Ort-Protesten eingestellt werden. Auch das aus 14 Flachbohrungen bestehende Anfangsprogramm der Standortuntersuchungen am Standort Lichtenhorst wurde aufgrund von Bevölkerungsprotesten verhindert. Lediglich am Standort Lutterloh erfolgten bis April 1976 umfangreichere geoelektrische Messungen, 12 Flachbohrungen und die dazugehörigen bohrlochgeophysikalischen Messungen sowie eine Tiefbohrung („Lutterloh 1001“), die bei einer Tiefe von 1531 m eingestellt wurde (KEWA 1977). Aber auch an diesem Standort wurden die Arbeiten (geplant war noch eine zweite Tiefbohrung im Zentralteil des Salzstocks) nach Vor-Ort-Protesten auf Weisung des BMFT am 10.08.76 endgültig abgebrochen, wobei sich die Gesamtkosten der bis dahin durchgeführten Untersuchungen auf 4,5 Mio. Mark beliefen. Der im Oktober 1977 fertig gestellte und die wesentlichsten Ergebnisse dieser Untersuchungen enthaltende Zwischenbericht (KEWA 1977) entspricht dem Abschlussbericht des KEWA-Vorhabens. Damit war das Auswahlverfahren des Bundes beendet.

Der Standort Gorleben wurde im Auswahlverfahren des Bundes für ein NEZ nicht berücksichtigt. Dies hatte ausschließlich raumordnerische Gründe, wie ein Auszug der Anlage 1 des KEWA-Berichts (1974), der den Landkreis Lüchow-Dannenberg in einer Vergrößerung zeigt (Abb. 51), belegt. Der Landkreis Lüchow-Dannenberg war großflächig von bestehenden Naturparks, Kurzerholungsgebieten und Ferienerholungsgebieten überdeckt. Damit schied aufgrund von raumordnerischen Gesichtspunkten der Landkreis und damit der Salzstock Gorleben frühzeitig im Auswahlverfahren aus und wurde in dem eigentlichen Auswahlverfahren nicht weiter berücksichtigt. Da die Ergebnisse der KEWA-Studie (1974) die Grundlage für die Beauftragungen der Gutachten von LÜTTIG & WAGER (1974) und KBB (1974) darstellten, ist der Standort Gorleben auch in diesen Arbeiten nie detailliert analysiert worden.

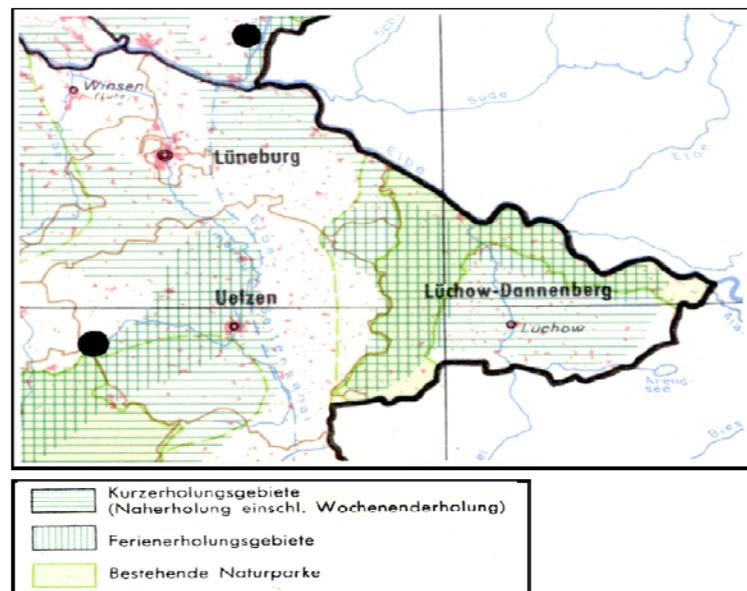


Abb. 51: Verteilung der Naturparks, Kurzerholungs- und Ferienggebiete im Bereich des Landkreises Lüchow-Dannenberg als Grund für die Nichtberücksichtigung des Standortes Gorleben im KEWA-Auswahlverfahren des Bundes (KEWA 1974)

In der KEWA-Studie (1977) wurde der Standort Gorleben erstmals als Alternative zu den im Jahre 1974 als günstig eingestuften Standorten benannt. Dies wurde mit Änderungen in den Auswahlkriterien erklärt, verursacht vor allem durch die in der Zwischenzeit getroffene Entscheidung, keine Wiederaufarbeitungsanlage am Endlagerstandort zu errichten (KEWA 1977):

„...Da jedoch seit der Standortermittlung im Jahre 1974 einige Auswahlkriterien hinsichtlich ihrer Bedeutung inzwischen anders bewertet werden, wurde 1976 nachgeprüft, ob sich neben Wahn, Lichtenhorst und Lutterloh neue Standortalternativen finden lassen. Diese Untersuchung wurde durchgeführt mit dem Ergebnis, dass die ursprünglich gewählten Standorte nach wie vor als sehr günstig anzusehen sind und dass sie lediglich vom Standort „Gorleben“ übertroffen werden.“

In diese Überlegungen flossen offensichtlich schon erste Ergebnisse des durch Niedersachsen ab 1976 durchgeführten Standortauswahlverfahrens ein (siehe weiter unten). Ein wesentliches Fazit des Suchverfahrens des Bundes war, dass ein NEZ mit angeschlossenem Endlager am günstigsten an einem norddeutschen Standort in der Nähe eines dafür geeigneten Salzstocks errichtet werden sollte.

4.5.2 Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen (1976 – 1977)

Im Anschluss an das Auswahlverfahren des Bundes führte Niedersachsen, das ein großes Interesse an einer solchen Industrieansiedlung hatte, ein Standortauswahlverfahren für ein Nukleares Entsorgungszentrum auf seinem Gebiet durch. Es berücksichtigte die Ergebnisse des Standortsuchprogramms des Bundes, wich aber durch Änderungen in der Bewertung einzelner Auswahlkriterien deutlich davon ab. Im Unterschied zum Vorgehen des Bundes stellte in Niedersachsen das Endlager im tiefen geologischen Untergrund schon zu Beginn des Auswahlverfahrens eine sehr wesentliche Komponente des Entsorgungszentrums dar. Dabei bestimmte der Endlagerstandort (es wurde davon ausgegangen, dass die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in einem dafür geeigneten Salzstock erfolgen soll) den Standort des gesamten Entsorgungszentrums. Das Niedersächsische Auswahlverfahren war von Anfang an auf Standorte mit Salzstöcken ausgerichtet, d. h. die Geologie war das entscheidende Auswahlkriterium. Raumordnerische Gesichtspunkte (z.B. Lage des Standortes möglichst außerhalb von Naturschutzgebieten) wurden betrachtet, hatten aber nicht eine solche herausragende Bedeutung wie im Auswahlverfahren des Bundes.

Schon im März 1976 wurde von der Landesregierung für die Standortauswahl eine interministerielle Projektgruppe benannt, deren streng vertrauliche Aufgabe es war, unabhängig von den bis dahin gelaufenen Voruntersuchungen des Bundes und der Industrie, Kriterien und Grundlagen für eine Standortauswahl zu erarbeiten. Beteiligt waren neben dem Wirtschaftsressort die Staatskanzlei, das Sozial-, das Innen- und das Landwirtschaftsministerium Niedersachsens. Je nach Bedarf wurden Fachleute aus dem Landesamt für Bodenforschung und aus dem zuständigen Oberbergamt herangezogen. Parallel dazu ließ sich die Landesregierung auch vom sogenannten „Energiebeirat“ unter Leitung von Carl-Friedrich Weizsäcker beraten. Die Kriterien zur Standortauswahl sind in einem Protokoll aus der 6. Sitzung des Umweltausschusses des Niedersächsischen Landtages in der 8. Wahlperiode vom 17.10.1977 dargestellt und werden nachfolgend näher beschrieben.

Das Niedersächsische Auswahlverfahren gliederte sich in 4 Phasen. Ausgangspunkt für den Beginn des kriteriengestützten Auswahlverfahrens war die Überlegung, dass zur Umsetzung des NEZ-Konzeptes ein Salzstock vorhanden sein muss. Daraufhin folgte eine generische Studie über die Salzstöcke Niedersachsens, in der geklärt wurde, ob im Bereich der Salzstöcke auf einem Gebiet von 3 x 4 Kilometern entsprechend notwendige Gebäudekomplexe übertägig errichtet werden könnten. Von 140 betrachteten Salzstöcken wurden 23 ausgewählt, die in der zweiten Phase des niedersächsischen Auswahlverfahrens in Bezug auf folgende fünf Ausschlusskriterien untersucht wurden:

- Lage des 3 x 4 Kilometer großen Standortgeländes im Vergleich zu den Salzstockumrissen,

- Größe des Salzstockes (je größer, desto besser),
- Tiefe des Salzstockes (nicht tiefer als 800 m unterhalb der Geländeoberfläche),
- Bevölkerungsdichte im in Frage kommenden Gebiet des Salzstockes sowie
- Bestehen konkurrierender Nutzungsansprüche (Gerichtsbarkeit/ Zuständigkeit, Berechtigungsgrenzen und Nutzungsrechte).

Von den 23 ausgewählten Standorten bzw. Salzstöcken blieben 13 übrig, die in der dritten Phase anhand von Kriterien aus einer raumordnerischen Empfehlung der Innenministerkonferenz zur Standortauswahl bei Energieanlagen und anhand von Bewertungsrichtlinien des Bundesinnenministeriums für KKW-Standorte und Kernenergieanlagen weiter bewertet wurden. Die Beurteilung erfolgte nach folgenden Kriteriengruppen:

a) Sicherheit und Umwelt:

- Radiologische Sicherheit und Strahlenschutz,
- Bevölkerungsdichte und -verteilung oberhalb und in der Nähe des Salzstockes sowie die sektorale Besiedlungsdichte,
- Beschaffenheit des Baugrundes,
- Risikobetrachtung bezüglich Erdbeben und Überflutungen,
- Dichte des Flugverkehrs,
- Aspekte der Lagerung und des Transports von explosiven Stoffen,
- meteorologische Bedingungen und
- radiologische Vorbelastungen des Standortes.

b) Geologie des Endlagerstandortes (als entscheidende Kriteriengruppe):

- vertikale Entfernung zwischen Top Salzstock und Geländeoberfläche (je größer desto besser),
- Lage des Tops des Salzstockes möglichst nicht tiefer als 500 m,
- Ausschluss von Gebieten, in denen Trinkwasserentnahmen stattfinden (oder geplant sind), keine Wasserwerke oder Grundwasservorranggebiete im Grundwasserabstrom des Standortes (prohibitiv) und

- Ausschluss von Landschaftsschutz- bzw. Naturschutzgebieten, Naturparks, Naturdenkmälern, Erholungsgebieten, Gebieten mit intensivem Tourismus und Touristenzentren.

c) Wirtschaftliche Aspekte:

- Standorte mit einer optimalen Verbindung zu regionalen und überregionalen Verkehrssystemen (Bundesbahn, Autobahn, Wasserstrassen) wurden bevorzugt,
- Oberflächennutzung für land- und forstwirtschaftliche Zwecke,
- Besiedlung sowie Abbaurechte und Eigentumsrechte in der unmittelbaren Nachbarschaft des Standortes und
- Wasserversorgung für das Entsorgungszentrum mit Grundwasser und Oberflächenwasser sowie die Möglichkeit der Einleitung von Salzlösungen.



Abb. 52: Lage der vier, in Phase 3 des Auswahlverfahrens des Landes Niedersachsen festgelegten potenziell möglichen HAW-Endlagerstandorte in der Nähe von Salzstöcken (1 – Börger, Salzstock Wahn; 2 – Ahlden, Salzstock Lichtenhorst; 3 – Salzstock Gorleben; 4 – Grube Mariagluck; Salzstock Höfer; blau – in Norddeutschland vorkommende Salzstrukturen)

Nach Phase 3 blieben von den 13 Standorten vier übrig (Abb. 52): Wahn, Lichtenhorst, Gorleben und Mariagluck (Salzstock Höfer). Die Ergebnisse wurden in einer Kabinettsvorlage im Dezember 1976 vorgestellt. In Phase 4 des niedersächsischen Auswahlverfahrens wurden die vier verbliebenen Standorte in der Arbeitsgruppe einer zusätzlichen intensiven Diskussion unterzogen. Dabei wiesen drei der Standorte mindestens ein Kriterium auf, das sie als möglichen Standort disqualifizierte. Der Standort am Salzstock Wahn wurde aussortiert, da er sich in der Nähe, teilweise unter einem Truppenübungsplatz der Bundeswehr befindet. Der Standort Lichtenhorst liegt in einem Grundwasservorranggebiet von Hannover. Der Standort Höfer entspricht aufgrund seiner geringen Größe und seiner geringen Tiefenlage sowie infolge seiner bisherigen wirtschaftlichen Nutzung als Gewinnungsbergwerk nicht den Auswahlkriterien.

Da derartige konkurrierende Nutzungsansprüche am Standort Gorleben fehlten (es wurde nur von geringen Kalisalzvorräten ausgegangen, JARITZ 1981) und der Salzstock aufgrund seiner Größe (40 km²), den prognostizierten mächtigen Steinsalzpartien im Kernbereich der Salzstruktur, seiner Tiefenlage (Salz in der Tiefe von 300 bis 3300 m) und seiner Unverritztheit geeignet war, wurde er vom Land Niedersachsen als möglicher Endlagerstandort vorgeschlagen. Zum Zeitpunkt der Vorauswahl des Salzstocks Gorleben waren infolge Fehlens detaillierter standortbezogener Untersuchungen der Internbau des Salzstocks und der strukturell-tektonische Aufbau des Deckgebirges nicht im Detail bekannt. Bis zum Start der Erkundungsarbeiten des Salzstocks standen lediglich Bohrergebnisse aus dem weiteren Umfeld und Informationen aus der 1926 stillgelegten Schachanlage „Teutonia-Wendland“ im Nachbarsalzstock Wustrow zur Verfügung. Demzufolge wiesen das Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld und das NLfB in einem Gutachten im April 1978 darauf hin (SCHUBERT & HOFRICHTER 1978), dass für den vorausgewählten Endlagerstandort „...noch eine erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten sein wird, ehe insbesondere für die Endlagerung hochaktiver Abfälle definitiv gesicherte Erkenntnisse und Unterlagen für den erfolgreichen Abschluss eines Planfeststellungsverfahrens zur Verfügung stehen werden.“

Nach der Empfehlung für den Standort Gorleben wurden im Winter 1976/77 verteidigungs- und deutschlandpolitische Bedenken gegenüber diesem Standort erörtert. Neben dem Risiko, das sich aus der Fortsetzung der Salzstruktur auf dem Gebiet der ehemaligen DDR ergab (Salzstock Rambow), wurden Bedenken der NATO, dass sich der politische Gegner Zugriff auf die Wiederaufarbeitungstechnologie und das Plutonium verschaffen könnte, diskutiert. Dessen ungeachtet fiel am 22.02.1977 auf der 65. Sitzung des Ausschusses für innere Verwaltung in Hannover die Entscheidung für Gorleben und die Landesregierung beschloss, den Antrag auf Errichtung des NEZ am Standort Gorleben zu prüfen. Im Juli 1977 akzeptierte der Bund die Standortentscheidung und beauftragte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) damit, die Voraussetzungen für die Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens für dieses Vorhaben zu schaffen. Im Oktober 1977 wurde

der Umweltausschuss des Niedersächsischen Landtages über das Auswahlverfahren informiert.

Seit 1979 wird in aufwändigen übertägigen (1979 bis 1984) und untertägigen geologisch-geophysikalischen sowie ingenieurgeologisch-hydrogeologischen Erkundungsarbeiten die Eignung des Salzstocks für den Bau eines Endlagers untersucht. Diese Arbeiten wurden im Oktober 2000 aufgrund einer politischen Vereinbarung zwischen den KKW-betreibenden Energieversorgungsunternehmen (EVU) und der Bundesregierung unterbrochen und infolge dessen noch nicht abgeschlossen. Eine abschließende Eignungsbewertung steht für den Salzstock Gorleben noch aus.

Sowohl das Verfahren des Bundes als auch das vom Land Niedersachsen im Anschluss daran realisierte Verfahren, das 1977 zur Auswahl des Salzstocks Gorleben als Standort für die Errichtung eines Erkundungsbergwerkes für Untersuchungen zur Eignung dieser Salzstruktur zur Endlagerung radioaktiver Abfälle führte, verliefen nachvollziehbar und in mehreren, aufeinander aufbauenden Schritten. Die Auswahlverfahren basierten vor allem auf fachlichen (u. a. raumordnerischen, geologischen, hydrologischen, wirtschaftlichen und geotechnischen) Gründen. Behauptungen, es habe kein Auswahlverfahren stattgefunden oder es erfolgte im Vorfeld der Standortauswahl keine Festlegung breit akzeptierter Auswahlkriterien sind ebenso falsch wie Äußerungen, der Standort sei ohne Beteiligung von Experten ausschließlich aus politischen Gründen benannt worden. Forderungen nach einem neuen Standortauswahlverfahren sind unter Hinweis auf vor der Standortauswahl nicht stattgefundenen, kriterienbezogene Standortvergleiche nicht begründbar. Ein Vergleich mit der heutigen internationalen Praxis weltweit durchgeführter Auswahlverfahren (Kap. 4) offenbart, dass die bis 1977 in Deutschland stattgefundenen Standortauswahl keine signifikanten Unterschiede oder inhaltliche bzw. konzeptionelle Mängel aufweist.

Ausgehend von dieser detaillierten Darstellung des Niedersächsischen Standortauswahlprozesses erfolgte die Benennung des Standortes Gorleben nachvollziehbar auf der Basis von Auswahlkriterien, die vor allem aus raumordnerischen und Langzeitsicherheitsüberlegungen abgeleitet wurden. Aufgrund der Vertraulichkeit der Arbeit der interministeriellen Projektgruppe sind die Ergebnisse der einzelnen Phasen bzw. der Weg der Entscheidungsfindung nicht öffentlich zugänglich. Dies ist aus heutiger Sicht und unter Zugrundelegung von mehr als 30 Jahren Erfahrung in internationalen Endlagerprojekten ein wesentlicher Mangel des Auswahlverfahrens, der viel Platz für Spekulationen, Misstrauen und Kritik an dem Verfahren, den Bewertungsgrundlagen und an der Standortentscheidung selbst lässt. Trotz dieser Einschränkung war das in den 1970er Jahren in Deutschland durchgeführte Auswahlverfahren für einen HAW-Endlagerstandort seiner Zeit weit voraus. Die heute geforderte Transparenz des Standortauswahlverfahrens war Mitte der 1970er Jahre nicht Stand von Wissenschaft und Technik.

Immer wieder wird bei der Diskussion des Endlagerprojektes Gorleben darauf hingewiesen, dass Standortalternativen in anderen Wirtsgesteinen, aber auch im Steinsalz selbst nicht ausreichend geprüft und untersucht worden sind. Eine Analyse der Historie der Endlagerforschung in Deutschland belegt, dass dies nicht richtig ist. Schon der Entscheidung für Steinsalz Ende der 1950er/Anfang der 1960er Jahre ging eine wissenschaftliche Analyse der Barriereigenschaften bzw. der Eignung unterschiedlicher Gesteinstypen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle voraus (siehe z. B. MARTINI 1963, RICHTER-BERNBURG & HOFRICHTER 1964). 1977 erstellte die BGR einen Katalog der zur Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle potenziell geeigneten geologischen Formationen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (KOCKEL & ROLAND 1977). Im Rahmen dieser Studie erfolgte keine Benennung konkreter Standorte. Vielmehr wurde auf der Grundlage der Mitte der 1970er Jahre vorhandenen geologischen Kenntnisse und der Standortauswahlkriterien für Salinarformationen, Tone/Tonsteine bzw. Tonmergelsteine sowie Intrusivgesteine sowie unter Zugrundelegung detaillierter Analysen der regionalen Verbreitung und der Faziesentwicklung der Gesteine die Eignung dieser Gesteinstypen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bewertet. Ein Vergleich der Verbreitung, Zusammensetzung sowie der Eigenschaften dieser unterschiedlichen Gesteinsformationen unterstrich die besondere Eignung des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge (z2HS) in den Salzstöcken NW-Deutschlands. Schon damals war klar, dass ein meist hoher Fremdmineralanteil bzw. zu starke Verunreinigungen mit Anhydrit und/oder Tonmineralen in den Salzgesteinen der Rotliegend- und Keupersalinare sowie der Alttertiär- bzw. Miozänsalze im südlichen bzw. nördlichen Oberrheingraben gegen ihre Eignung sprach. Zu geringe Steinsalzmächtigkeiten führten in Verbindung mit der flachen Lagerung der Salzschichten zum Ausschluss des Werra-Steinsalzes in Hessen, Franken, am Niederrhein und im Emsland sowie des Röt- und Muschelkalksalzes (in Kombination mit zu großen Teufenlagen). Wegen zu geringer Mächtigkeiten ihrer Steinsalz-Anteile kamen auch die Zechsteinablagerungen der Leine- und Aller-Folgen nicht in Betracht.

Granitoid- und Tonsteinformationen wurden als prinzipiell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignete Wirtsgesteine angesehen. Allerdings wiesen KOCKEL & ROLAND (1977) für die Mehrheit der Tonformationen Deutschlands auf zahlreiche Einschränkungen hin und führten als wesentlichste Gegenargumente die geringe Standfestigkeit (Ausbau erforderlich), die ungünstigen thermischen Eigenschaften, häufige Sand- und Kalksteineinlagerungen sowie z. T. die Nähe zu bedeutenden Grundwasserspeichern (z. B. Miozänsande) und zu erdbebengefährdeten Gebieten (Oligozän-Tonmergel im Oberrheingebiet) an. Die spätorogenen, nur schwach metamorph überprägten bzw. deformierten granitischen Gesteine im Odenwald, Schwarzwald, Fichtelgebirge, Oberpfälzer und Bayerischen Wald wurden aufgrund ihrer felsmechanischen Eigenschaften als prinzipiell geeignet für die Endlagerung radioaktiver Abfälle angesehen. Allerdings wurde auf die Notwendigkeit detaillierter Untersuchungen einzelner Plutone insbesondere hinsichtlich

des Vorkommens von magmatischen Gängen sowie in Bezug auf Homogenität und Deformation der Gesteine hingewiesen.

Auch in den nachfolgenden Jahren wurden mehrfach Standortalternativen geprüft. So zeigt beispielsweise Abb. 53 die Ergebnisse mehrerer BGR-Studien (BRÄUER et al. 1994, KOCKEL & KRULL 1995) zur Ausweisung untersuchungswürdiger Regionen in salinaren und kristallinen Formationen Deutschlands, in denen mehrere potenziell geeignete Standortregionen benannt wurden. Ausgehend von dem in Deutschland vereinbarten sukzessiven Vorgehen bei der untertägigen Eignungsbewertung konkreter Standorte (siehe Kap. 3), stehen für den Fall der Nichteignung des Standortes Gorleben aufgrund dieser Arbeiten mehrere Standortalternativen zur Verfügung.



Abb. 53: Verteilung von potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneten Vorkommen alternativer Wirtsgesteinstypen in Deutschland (Salinarstrukturen: I – Wahn, II – Zwischenahn, III – Gülze-Sumte, IV – Waddekath; Kristallinregionen: 1 – Saldenburg, 2 – nördlicher Oberpfälzer Wald, 3 – Fichtelgebirge, 4 – Graugneis Erzgebirge, 5 – Granulitgebirge, 6 – Pretzsch, 7 – Prettin, 8 – Pulsnitz, 9 – Radeberg-Löbau, 10 – Ostlausitz-Zawidow; BGR 2006)

Nach dem deutschen Endlagerkonzept muss innerhalb des Mehrbarrierensystems die geologische Barriere die Hauptlast beim Schutz der Biosphäre tragen. Aus den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden zu kristallinen Gesteinen geht hervor, dass in Deutschland homogene und ungeklüftete Bereiche in einer für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes notwendigen räumlichen Ausdehnung (ca. 10 km²) wahrscheinlich nicht zu erwarten sind. Wegen der geringen Ausdehnung ungeklüfteter Bereiche, einem i.d.R. engständigen und weit reichenden Störungsmuster sowie der meist hohen Durchlässigkeit in geklüfteten Bereichen werden Kristallingesteine in Deutschland

nicht weiter als Wirtsgesteinsalternativen zum Steinsalz angesehen (BRÄUER et al. 1994, BGR 2006).

Legt man die Mindestanforderungen und Kriterien für die Standortauswahl (siehe Kap. 3) zugrunde, kommen in Deutschland für die Ausweisung von Wirtsgesteinsregionen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit lediglich Steinsalzvorkommen und Tongesteinsformationen in Betracht. Trotz einiger Vorbehalte gegenüber der Nutzung von Tonsteinen als Endlagerwirtsgesteine (siehe Kap. 2.3), wurden Ende der 1990er Jahre umfangreiche Forschungsprojekte zur Untersuchung der Barriereigenschaften von Tonformationen und zur Ausweisung von eignungshöffigen Standortregionen initiiert. Die Ergebnisse der geologischen Untersuchungen zur Bewertung der Nutzung der in Deutschland vorkommenden Tonformationen wurden in einer umfangreichen BGR-Studie dargestellt (HOTH et al. 2007, Abb. 54 und 55). Mit diesen Arbeiten wurden, für den Fall der Nichteignung des Standortes Gorleben, die Grundlagen für detaillierte geologische Untersuchungen von Standorten in den ausgewiesenen potenziell geeigneten Standortregionen geschaffen.

System / Abteilung		Serie / Stufe	Norddeutschland		Süddeutschland	
			W	E	W	E
Tertiär	Quartär	ca. 1,8				
	Neogen	Pliozän				
		Miozän				
	Paläogen	Oligozän				
		Eozän				
		Paläozän				
Dan						
Kreide	Oberkreide	ca. 65				
		Mastricht				
		Campan				
		Santon				
		Coniac				
	Unterkreide	Turon				
		Cenoman				
		Alb				
		Apt				
		Barrême				
Jura	Oberjura (Malm)	ca. 145				
		"Serpült"				
		"Münder Mergel"				
		"Eimbeckhäuser P.-K."				
		"Gigas-Schichten"				
		Kimmeridge				
	Mitteljura (Dogger)	"Korallenoolith"				
		"Heersumer Sch."				
		Callov				
	Unterjura (Lias)	Bathon				
		Bajoc				
		Aalen				
Toarc						
Pliensbach						
Trias	Keuper	ca. 205				
		O	Rhät			
		M	"Steinmergelkeuper"			
		U	"Oberer Gipskeuper"			
	Muschelkalk	"Schilfsandstein"				
		"Unterer Gipskeuper"				
		"Lettenkeuper"				
	Buntsandstein	O	"Ob. Muschelkalk"			
		M	"Mittl. Muschelkalk"			
		U	"Unt. Muschelkalk"			
O		"Röt"				
M		"Solling-Folge"				
U		"Hardeggen-Folge"				
Perm	Oberperm (Zechstein)	ca. 250				
		"Möln-Zyklus"				
		"Friesland-Zyklus"				
		"Ohre-Zyklus"				
		"Aller-Zyklus"				
		"Leine-Zyklus"				
		"Staufurt-Zyklus"				
	"Werra-Zyklus"					
Unterperm (Rotliegend)	Oberrotliegend					
	Unterrotliegend					

Abb. 54: Stratigraphische Position der bezüglich ihrer Eignung für die HAW-Endlagerung als untersuchungswürdig eingestuft Tonformationen Deutschlands (HOTH et al. 2007)

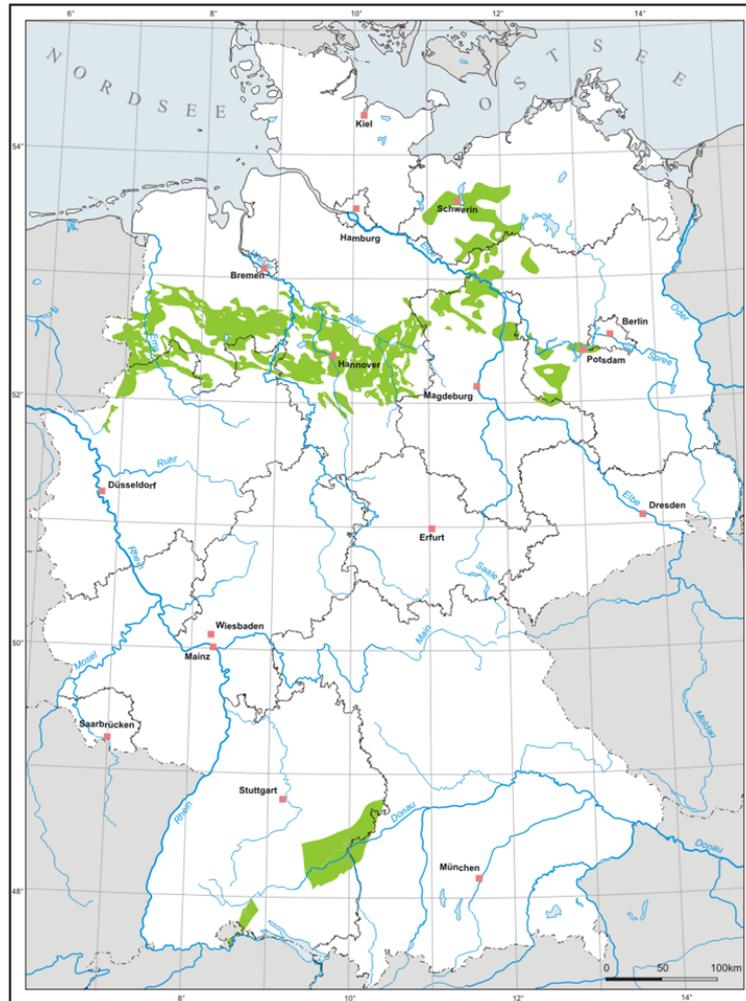


Abb. 55: Karte der Verteilung der untersuchungswürdigen Tonformationen in Deutschland (HOTH et al. 2007)

Im Ergebnis der Anwendung geowissenschaftlicher Standortanforderungen (siehe Kap. 3.3.2) sind zahlreiche Einschränkungen bei der Nutzung der in Deutschland vorkommenden Tongesteine zur HAW-Endlagerung zu berücksichtigen. So z. B. stellen die weitverbreiteten Tertiärtone Norddeutschlands zwar wichtige hydrogeologische Barrieren dar, ihre Eignung für die HAW-Endlagerung ist jedoch aufgrund des geringen Verfestigungsgrades und des dadurch erforderlichen Ausbaus der Bergwerksauffahrungen als sehr eingeschränkt zu beurteilen. Sie können deshalb bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle zwar als Barrieregesteine in einer günstigen geologischen Gesamtsituation von Bedeutung sein, aber als Wirtsgesteinsoption können sie nicht betrachtet werden.

Die tertiären Tone und Tonsteine des Alpenen Vorlandbeckens sind aufgrund ihrer starken lithologischen Variabilität nur schwer charakterisierbar und prognostizierbar. Da sie außerdem zum großen Teil nur einen geringen Verfestigungsgrad aufweisen, werden sie als Wirtsgesteinsoption ebenfalls nicht berücksichtigt. In Teilbereichen des Verbreitungsgebietes des Opalinustons in Süddeutschland schränkt ein bedeutender, intensiv genutzter Karst-Grundwasserleiter im Deckgebirge eine Nutzung ein. Außerdem steht durch die im Vergleich zu Norddeutschland größere Tiefenlage der Tonsteinvorkommen eine geringere Temperaturreserve für die Einlagerung der Wärme entwickelnden Abfälle zur Verfügung.

4.6 USA

Die U.S. Atomic Energy Commission (AEC), der Vorgänger des US Department of Energy (DOE), hat bereits 1955 die National Academy of Sciences (NAS) beauftragt, zu prüfen, welche Gesteine sich zur Endlagerung von radioaktiven Stoffen aus der militärischen Nutzung der Kernenergie (vor allem aus dem Nuklearwaffenprogramm der USA) eignen.

Die NAS empfahl, ausgehend von seit Mitte der 1950er Jahre durchgeführten Salzstudien, die Endlagerung in Salzformationen. Schon 1957 wurde in den USA ein landesweites „screening“ zur Auffindung von potenziell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeigneten Steinsalzlagerstätten durchgeführt. Abb. 56 zeigt die flächenmäßig große Verbreitung von Salzformationen in den USA.

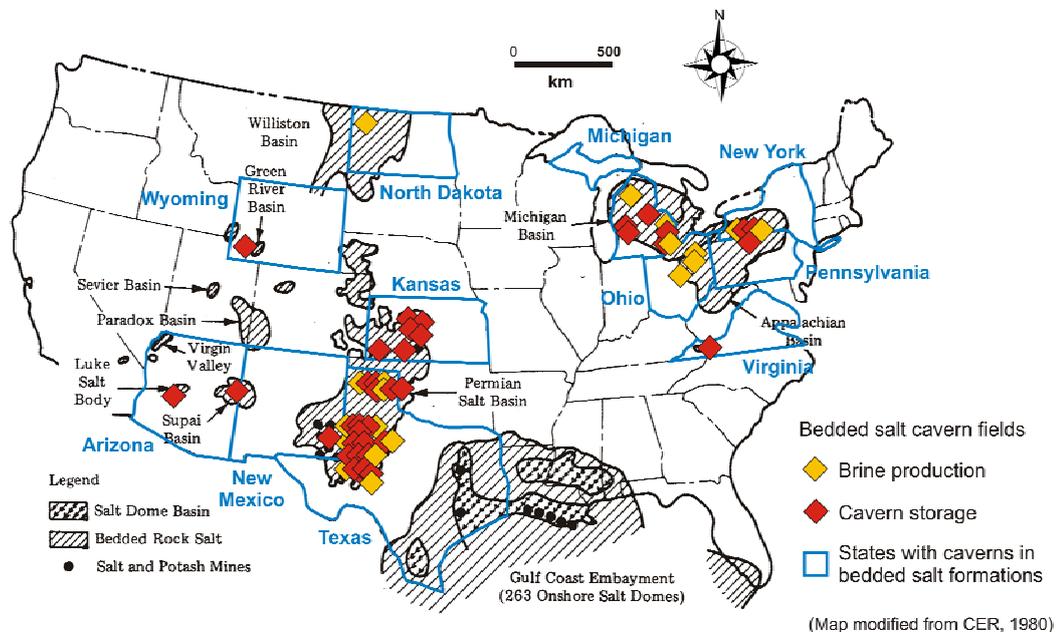


Abb. 56: Vorkommen von Salzlagerstätten in den USA (KBB 2007)

Ausgehend von den in dieser Phase vorliegenden Kenntnissen zum strukturgeologischen Bau und zur lithologischen Zusammensetzung der Salzgesteine sowie zu ihrer damals bereits realisierten bzw. geplanten wirtschaftlichen Nutzung wurden 1962 auf der Grundlage eines durch den US Geological Survey (USGS) erstellten Berichtes zur Verteilung der Salzlagerstätten (PIERCE & RICH 1962) vier Regionen für eine detaillierte Analyse ihrer Eignung als Endlagerregionen benannt:

- Salzstöcke am Golf von Mexico in Texas, Louisiana und Mississippi,
- flach lagernde Salze im Paradox-Becken in Utah,
- flach lagernde Salze im Perm-Becken in Kansas, Oklahoma, Texas, Colorado, Arizona und New Mexico,
- flach lagernde Salze im Salina-Becken in Michigan, Ohio, Pennsylvania und New York.

Eine besonders gute Bewertung erhielten die permischen, etwa 250 Mio. Jahre alten Salzlagerstätten, wie u. a. die Vorkommen im Delaware-Becken in SE New Mexico und große Gebiete in Kansas, W Texas und Oklahoma.

1970 wählte die AEC auf Anraten des USGS einen Standort in Lyons, Kansas aus, an dem ein außer Betrieb gegangenes Salzbergwerk für den Bau des geplanten Endlagers genutzt werden sollte. Wegen politischen Widerstandes und Sicherheitszweifeln wurde das Projekt zur Nutzung des ehemaligen Salzbergwerkes jedoch 1972 aufgegeben. Nach detaillierten Untersuchungen von vier Standorten in New Mexiko durch den USGS legte das DOE 1974 die in der Chihuahua-Wüste gelegene Salzformation in SE New Mexico, ca. 40 km östlich von Carlsbad, als Standort für das Endlager für radioaktive Abfälle aus der militärischen Nutzung der Atomkraft fest (Abb. 57). Der Standort befindet sich am nördlichen Rand des Delaware-Beckens, das mit einer etwa 7000 m mächtigen Sedimentabfolge gefüllt ist. Die Schichten fallen mit weniger als 1° nach E ein.



Abb. 57: Geographische Lage des in einer flach lagernden permischen Salzformation befindlichen Endlagerstandortes WIPP in den USA

Die Gründe für diese Standortauswahl wurden nicht publiziert und waren aufgrund des militärischen Charakters der Anlage auch nie öffentlich diskutiert worden. Ein heute weltweit gefordertes transparentes Standortauswahlverfahren war Anfang der 1970er Jahre nicht Stand der Wissenschaft und Technik. Aufgrund der zu erwartenden Langzeitsicherheitsprobleme wurde bewusst kein altes Salzgewinnungsbergwerk als Endlagerstandort ausgewählt (siehe auch Kap. 3.2). Die Abfälle sollen in der subhorizontal lagernden, ca. 600 m mächtigen permischen Salado-Formation in einer Tiefe von 655 m endgelagert werden (Abb. 58 und 59). Die Gesteine sind etwa 225 – 250 Mio. Jahre alt, weisen sehr geringe Porositäten (ca. 0,01 %) und Permeabilitäten (etwa $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, POWERS et al. 1978) auf und bestehen zu 85 bis 90 % aus Steinsalz. Der untergeordnet vorkommende Anhydrit bildet 43 Leithorizonte. Das Top der Salzsichten liegt etwa 400 m unter der Geländeoberfläche. Die Gesamtmächtigkeit der ausgewählten Steinsalz-Formation erreicht ca. 1000 m, die Einlagerung der Abfälle sollte in 90 m langen, 10 m breiten und 4 m hohen Kammern erfolgen.

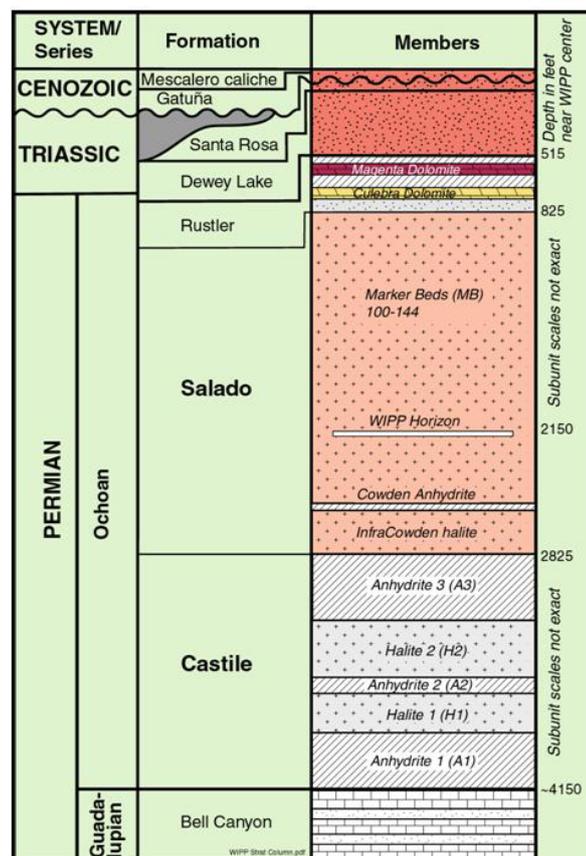


Abb. 58: Stratigraphische Abfolge am Standort der WIPP (POWERS 2007). Die Position des Endlagers innerhalb der hier ca. 600 m mächtigen permischen Salado-Formation (Zechstein-Salz) ist mit „WIPP-Horizon“ bezeichnet.

System	Serie	Formation	Lithologie	Mächtigkeit [m]	
rezent			Sande		
QUARTÄR	Pleistozän	Gatuna	roter bis grauer, feinkörniger, bröckeliger Sandstein, bedeckt mit einer 1,5 – 3,0 m mächtigen Kalksteinkruste (Calcit)	0 – 10,7	
TERTIÄR	Obere Trias	Santa Rosa	schwach roter bis grauer, kreuzgeschichteter, nicht-mariner, mittel- bis grobkörniger, bröckeliger Sandstein	0 – 76,2	
PERM	Ochoan	Dewey Lake	rot-brauner, mariner Ton- und Schluffstein mit Zwischenlagerungen von Sandstein	31,0 – 170,0	
		Rustler	Anhydrit mit Schluffsteinlagen und zwei Dolomit-Leithorizonten (Magenta & Culebra)	84,0 – 131,0	
		Salaco	Upper Mbr.	85-90% Steinsalz, mit 43 untergeordneten zwischengelagerten Anhydrit-Leithorizonten; Polyhalit, tonigschluffige Klastika, Spuren von Kalisalz in der McNutt-Zone	534,0 – 611,0 WIPP-Endlager
			McNutt Mbr.		
			Lower Mbr.		
		Castile	Anh. III + IV	Warvenschichtung von Anhydrit- und Calcit-Lagen alternierend mit dicken Halitschichten	382,0
			Halit II		
			Anhydrit II		
			Halit I		
		Guadalupean	Bell Canyon (Delaware Sand)	meist feinkörniger Sandstein mit tonigen und kalkigen Intervallen; am Top sehr toniger Kalkstein (Lamar Member)	305,0

Abb. 59: Lithologischer Aufbau der Schichtenfolge am Standort der Waste Isolation Pilot Plant, USA (SCHUBARTH-ENGELSCHALL 2003)

Der Standortauswahl für das als „Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)“ bezeichnete Endlagerprojekt wurden, wie es für militärische Anlagen zu dieser Zeit üblich war, noch keine im Vorfeld festgelegten Verfahrensschritte und Handlungsanweisungen für den Vergleich von Standortalternativen zugrunde gelegt. Ähnlich wie in Deutschland (siehe Kap. 4.5), gab es allerdings auch in dieser frühen Phase der Standortsuche in Salzlagerstätten der USA Auswahlkriterien für potenziell geeignete Salzvorkommen (REMPE 2008).

Eine Beteiligung der Öffentlichkeit war während des Auswahlverfahrens bis 1992 nicht vorgesehen. Zwar gründete der Staat New Mexico 1978 die Environmental Evaluation Group (EEG), die als unabhängige Institution prüfen sollte, ob die öffentlichen Interessen in Bezug auf die Gesundheit und die Umwelt eingehalten werden. Allerdings verpflichtete sich das DOE erst nach einer Klage des Staates New Mexico im Jahr 1991, dem Staat eine unabhängige Beobachtung zu erlauben. In Übereinstimmung mit dem Administrative Procedure Act (APA) sind im Rahmen der Zertifizierung des Endlagers öffentliche Anhörungen und regelmäßige Informationsveranstaltungen vorgesehen. Als Reaktion auf diese gesetzliche Forderung eröffnete die DOE 1993 das Carlsbad Area Office (ab 2000 – Carlsbad Field Office, CBFO), das eine engere Zusammenarbeit mit den regionalen Behörden und der Bevölkerung gewährleisten und damit die Glaubwürdigkeit der DOE erhöhen bzw. eine bessere Vertrauensbasis schaffen soll.

Der Beginn der Erkundungsarbeiten zur Charakterisierung des Standortes ist auf das Jahr 1975 datiert. 1979 erhielten die Betreiber des WIPP die Genehmigung zur In-situ-Erforschung der Wirtsgesteinseigenschaften und zur Entwicklung von Einlagerungsmethoden an diesem Standort. Zwei Jahre später wurde als Vorstufe zum WIPP-Bau mit der Errichtung des URL's, d. h. mit dem Abteufen der Schächte begonnen. 1988 waren die oberirdischen Gebäude und die Untertage-Infrastrukturauffahrungen fertig gestellt. Im Zeitraum von 1983 bis 1995 wurde eine Vielzahl von In-situ-Tests durchgeführt, um die Eignung der Steinsalzformation zur Endlagerung radioaktiven Abfalls nachzuweisen. Bis 1993 wurde die WIPP deswegen als Testprojekt geführt, für das eingeschränkte Sicherheitskriterien mit der Genehmigungsbehörde vereinbart wurden.

In Verbindung mit den sich, wegen der langen Projektlaufzeit ergebenden Veränderungen der Sicherheitskriterien, denen die WIPP genügen muss, kam es immer wieder zu Verzögerungen bei der Erarbeitung der Unterlagen für das Genehmigungsverfahren und bei der Inbetriebnahme des WIPP. In den ersten neun Jahren nach der Standortauswahl gab es keinen offiziell dokumentierten Kriterienkatalog. Erst 1983 wurde in einer Vereinbarung zwischen DOE und dem Staat New Mexico festgelegt, dass die WIPP allen einschlägigen Gesetzen und Vorschriften der USA und des Staates New Mexico für vergleichbare zivile Anlagen genügen muss. Weitere spezifische Regelungen wurden erst 1985 erarbeitet. Einige davon mussten 1987 überarbeitet werden, da sie von einem Bundesgericht als ungenügend angesehen wurden. Dies betraf u. a. die Regelungen in Bezug auf den Trinkwasserschutz nach dem Safe Drinking Water Act (SDWA) und die Grundlagen, die den Berechnungen der individuellen Dosis zugrunde lagen.

Verzögerungen bei der Genehmigung und Inbetriebnahme des WIPP gab es auch dadurch, dass sich die Genehmigungsbehörde im Verlaufe der Zeit mehrfach geändert hat. Bis 1992 befand sich die WIPP als militärisches Projekt in der Zuständigkeit des Armed Services Committees im Kongress. Im Verlaufe der Erarbeitung des Ende 1992 vom Kongress unterzeichneten WIPP Land Withdrawal Act, mit dem ein ca. 41 km² großes Gelände dem DOE für die Errichtung des Endlagers zugeteilt wurde, ist die Environmental Protection Agency (EPA, Staatliche Behörde für Umweltschutz) als Genehmigungsbehörde eingesetzt worden. Die EPA übertrug später einen Teil ihrer Zuständigkeiten dem New Mexico Environmental Department (NMED), das die Kontrolle über die Einhaltung der Vorschriften zur Lagerung von chemotoxischen Abfällen zu gewährleisten hatte.

Im Jahr 1993 wurden die neuen Regelungen der EPA fertig gestellt und traten 1996 in Kraft (WIPP Compliance Criteria, 40 CFR Part 191 and 194). Am 29.10.1996 stellte das DOE bei der EPA den Antrag auf Zertifizierung des Endlagers (compliance certification application, CCA). Am 13.05.1998 wurde die WIPP nach Prüfung der durch das DOE erstellten Unterlagen durch die EPA erstmalig zertifiziert. Vor der Genehmigung erfolgte ein Peer-Review der Sicherheitsanalyse durch die OECD-NEA, in Zusammenarbeit

mit der IAEA und unter Beteiligung von Fachleuten aus Kanada, Deutschland, Japan, Spanien, Schweden und Finnland. Eine erneute Zertifizierung erfolgte 2006 im Zuge einer Nachuntersuchung, die alle fünf Jahre stattfindet und prüfen soll, ob die WIPP basierend auf den aktuellen Daten und nach dem Stand der Technik den Sicherheitsstandards entspricht. Knapp 30 Jahre nach dem Beginn des Standortauswahlverfahrens fand am 26.03.1999 die Eröffnung der WIPP und die Einlagerung des ersten Abfalls aus den Los Alamos National Laboratories statt.

Die WIPP ist weltweit die einzige Anlage zur Endlagerung von langlebigen, alpha-Strahlen emittierenden radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen, die bisher nach einem Genehmigungsverfahren in Betrieb genommen wurde. Da sich das Vorgehen für die Errichtung von militärischen Anlagen von dem für zivile Einrichtungen in Bezug auf die Vorgehensweise, die Transparenz und die Einbeziehung der Öffentlichkeit unterscheidet, nimmt die WIPP eine Sonderstellung ein. Die Einlagerung hochradioaktiver, Wärme entwickelnder Abfälle ist in der WIPP per Gesetz ausgeschlossen.

Parallel zu den Arbeiten in der Salzformation in New Mexico wurde Mitte der 1970er Jahre zusätzlich nach Möglichkeiten gesucht, hochradioaktive Abfälle aus der zivilen Nutzung der Kernkraft separat vom WIPP endzulagern. Das 1977 unter Leitung des Office for Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM) des US Department of Energy (DOE) gestartete „site screening“ erfolgte mit der Zielvorgabe, potenziell geeignete Regionen in Bundesstaaten, in denen bereits mit radioaktivem Material gearbeitet wurde, auszuweisen. Im Ergebnis dieses „screenings“ wurden 1978/1979 das Hanford Gebiet, Washington, und das Nevada Kernwaffentestgelände, das 1975 durch den Bundesstaat Nevada selbst als Endlagerstandort vorgeschlagen wurde, als potenziell geeignete Standortregionen empfohlen.

Breite Kritik an der Vorgehensweise und an der mangelnden Einbeziehung der Öffentlichkeit in den Auswahlprozess führte zur Forderung nach der Schaffung einer gesetzlichen Grundlage für die Standortsuche. Deshalb wurde 1982 das DOE beauftragt, allgemeine Richtlinien für die Auswahl von Endlagerstandorten zu entwickeln und im Ergebnis des auf dieser Grundlage durchgeführten Auswahlprozesses drei Standorte zu benennen, an denen jeweils Standortuntersuchungen durchgeführt werden können. 1982 verabschiedete der amerikanische Kongress den Nuclear Waste Policy Act (NWPA), in dem der Ablauf einer Standortauswahl in den USA gesetzlich festgelegt wurde. 1983 wurden zunächst neun Standorte in sechs Bundesstaaten in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tuff ausgewählt, darunter auch das Nevada Test Gebiet und das Hanford Gebiet (Abb. 60). Die Auswahl beruhte auf Übersichtsstudien und bereits vorhandenen Datensammlungen.



Abb. 60: Ablauf und Ergebnisse der in den 1980er Jahren schrittweise durchgeführten Reduzierung der Anzahl möglicher HAW-Endlagerstandorte in den USA (von links nach rechts: 1 – 1984, 2 – 1986, 3 und 4 – 1987; Quelle DOE)

1985 wurden nach Abschluss der Vorstudien fünf Standorte als geeignet bezeichnet, von denen schließlich drei (Hanford in Washington, Deaf Smith County in Texas und Yucca Mountain in Nevada) für eingehende wissenschaftliche Standortuntersuchungen vorgeschlagen wurden (Abb. 60). 1987 wurden jedoch die Standortuntersuchungen per Gesetzesänderung (Änderung des 1982 beschlossenen Nuclear Waste Policy Act durch den NWPA Amendments Act) auf einen Standort beschränkt. Durch die Bundesregierung wurde der Standort Yucca Mountain ausgewählt (MACFARLANE et al. 2006), der ca. 130 km NW von Las Vegas an der westlichen Grenze der Nevada Test Site liegt und aus dem Wirtsgestein Tuff aufgebaut ist (Abb. 61 und 62).

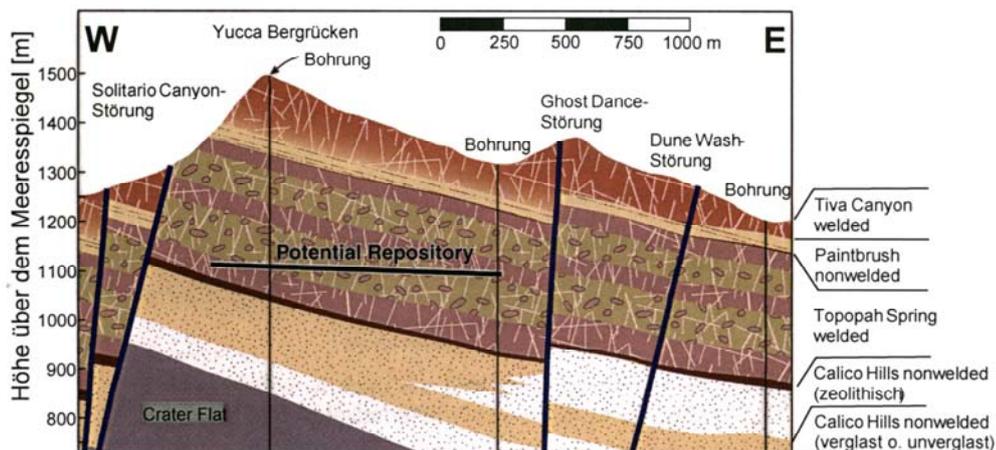


Abb. 61: Schematischer geologischer Schnitt durch den Yucca Mountain mit den wichtigsten hydrogeologischen Einheiten (SCHUBARTH-ENGELSCHALL 2003)

Die Standortentscheidung wurde nach umfangreichen geowissenschaftlichen Untersuchungen und Langzeitsicherheitsbetrachtungen getroffen. Die wesentlichsten Argumente für den Standort Yucca Mountain waren:

- die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge beträgt nur ca. 20 mm, wovon 95 % an der Erdoberfläche abfließen oder verdunsten (dazu im Vergleich beträgt die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in der BRD 760 mm),
- sehr niedrige Erosionsraten,
- sehr geringe Gefahr von Vulkanismus und Erdbeben,
- Endlagertiefe ca. 300 m unterhalb der Erdoberfläche,
- Endlager befindet sich ca. 300 m oberhalb des Grundwasserspiegels,
- die Wirtsgesteinsformation (Topopah Spring Tuff) ist ca. 375 m mächtig und
- es handelt sich um eine geschlossene Beckenstruktur, d. h. das geplante Endlager hat keinen Einfluss auf Grundwassereinzugsgebiete benachbarter Regionen.

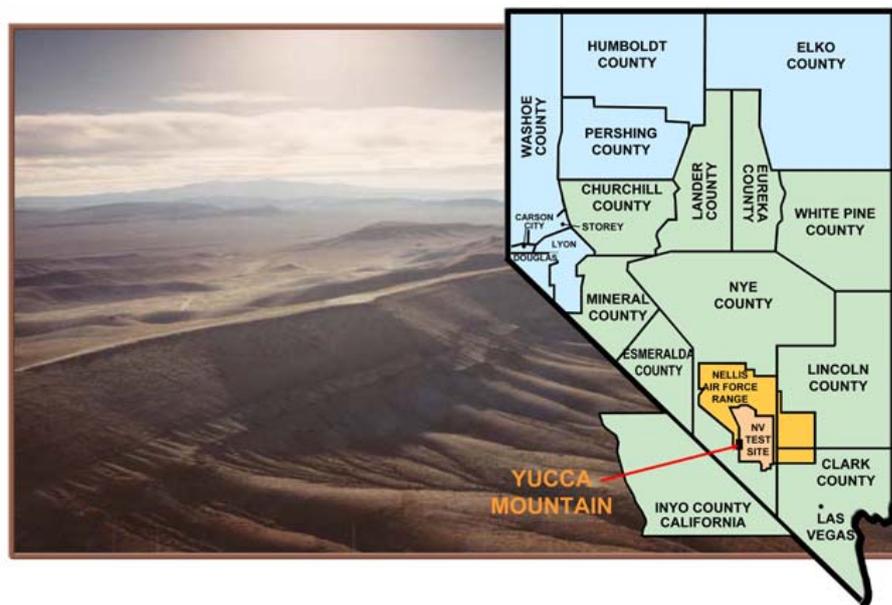


Abb. 62: Geographische Lage und Oberflächenansicht des in der Chihuahua-Wüste gelegenen Endlagerstandortes Yucca Mountain in den USA (Quelle DOE)

Weitere wichtige Gründe für die Auswahl von Yucca Mountain waren die Vornutzung des Geländes (Nevada Test Site) sowie die Bodenbesitzverhältnisse (das Gelände gehört dem Staat). Außerdem war der Bundesstaat Nevada politisch relativ schwach, so dass wenig Widerstand gegen den Endlagerbau zu erwarten war. Für den Fall, dass sich dieser Standort im Ergebnis der Standortuntersuchungen als nicht geeignet erweisen sollte, war ein sofortiger Stopp der Erkundungsarbeiten und eine Entscheidung des Kongresses bezüglich eines neuen Standortes vorgesehen.

Von 1987 bis 1994 erfolgte die konzeptionelle Entwicklung und Planung eines URL am Standort Yucca Mountain. Im Zeitraum von 1994 bis 1997 wurde das URL mit dem Ziel errichtet, strukturgeologische Kartierungen und detaillierte Untersuchungen der hydrogeologischen, mineralogisch-geochemischen und thermo-mechanischen Eigenschaften der aufgeschlossenen stratigraphischen Einheiten durchzuführen. 1997 – 1998 wurde die „Cross Drift“ aufgeföhren, um die gesamte Yucca Mountain-Schichtenfolge charakterisieren sowie ein hydraulisches Monitoringsystem einrichten zu können. 1998 wurde eine Studie über die Realisierbarkeit eines Endlagers am Standort Yucca Mountain vorgelegt, aus der im Jahr 2000 die TSPA-SR (Total System Performance Assessment for Site Recommendation) entstand, die nach einem gemeinsamen Peer Review durch IAEA und OECD dem US-Präsidenten vorgelegt wurde.

Im Februar 2002 wurde nach ca. 20 Jahren Erkundungstätigkeit bilanziert, dass nach den gesetzlich fixierten Kriterien der Standort Yucca Mountain als HAW-Endlagerstandort geeignet ist. Im Mai 2002 entschied der Senat unter Zugrundelegung der vom DOE aufgestellten Auswahl- und Sicherheitskriterien sowie der zum Standort Yucca Mountain vorliegenden geologischen Erkundungsergebnisse und Langzeitsicherheitsanalysen, das Genehmigungsverfahren für den Bau eines Endlagers am Standort Yucca Mountain einzuleiten. Im Juli 2002 folgten die Zustimmungen des Präsidenten und des Kongresses zum Endlagerbau (bei Verwerfen des Vetos des Gouverneurs von Nevada). 2004 bestätigte das US-Appellationsgericht in Washington die Genehmigung unter der Auflage, dass der Sicherheitsnachweis nicht nur für 10000 Jahre sondern für 1 Mio. Jahre zu führen ist, und wies alle Einsprüche zurück. Nach entsprechenden Änderungen der Lizenzierungsunterlagen beantragte das DOE am 3.06.2008 bei der Genehmigungsbehörde (NRC) offiziell den Bau des Endlagers.

Anfang 2009 wurde durch die neue US-Regierung die Finanzierung des Yucca Mountain-Projektes mit dem Hinweis weitgehend eingestellt, dass eine neue Entsorgungsstrategie für die HAW-Abfälle geplant ist. Am 05.03.2009 erfolgte anlässlich einer Senatsanhörung die Mitteilung durch das US-Energieministerium, dass der Standort Yucca Mountain zukünftig keine Option mehr für ein HAW-Endlager darstellt.

5 Zusammenfassung und Bewertung

Für die Endlagerung von HAW-Abfällen werden aufgrund ihres langfristigen Isolationspotenzials weltweit tief lagernde geologische Formationen vorgesehen. Die jeweiligen Endlagerkonzepte richten sich neben technischen Anforderungen, die sich aus der Art der Abfälle und ihrer Menge ergeben, vor allem nach den spezifischen Eigenschaften der jeweils zur Verfügung stehenden Wirtsgesteine. Prinzipiell werden die Wirtsgesteine Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin aufgrund ihrer Barriereigenschaften als mögliche Wirtsgesteine für HAW-Endlager angesehen. Sie besitzen jedoch unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften, die eine gesteinspezifische Anpassung der Endlagerkonzepte erforderlich machen.

Die Auswahl des Wirtsgesteins richtet sich in erster Linie nach den national vorhandenen geologischen Formationen, eine Wahlmöglichkeit steht in den meisten Ländern nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung. Die Suche nach Endlagerstandorten in verschiedenen Gesteinsformationen berücksichtigt deshalb in erster Linie die spezifische regionale, nationale Geologie sowie die Anforderungen der nationalen Entsorgungskonzepte. So z. B. werden Schweden und Finnland ihre radioaktiven Abfälle in Granitoidformationen lagern, da beide Länder auf dem Baltischen Schild liegen, das sich aus präkambrischen und damit sehr alten, überwiegend SiO₂-reichen magmatischen Gesteinen zusammensetzt und nur begrenzt geringmächtige sedimentäre Deckschichten aufweist. Aufgrund seiner geologischen Entwicklung verfügt Skandinavien über keine für die Endlagerung geeigneten Salz- oder Tonsteinvorkommen.

Die Verbreitung der Salzlagerstätten in Europa verdeutlicht, dass sich die Möglichkeiten zur Endlagerung im Salz auf wenige Länder beschränken. Viele der Salzlagerstätten sind allerdings zu jung (d. h. lagern zu flach unterhalb der Erdoberfläche), zu geringmächtig oder aufgrund ihres strukturellen bzw. lithologischen Aufbaus nicht für eine HAW-Endlagerung geeignet. Solche immer wieder mit Deutschland hinsichtlich ihrer Endlagerkonzepte verglichenen Länder, wie die Schweiz, England, Frankreich, Japan oder Schweden sind aufgrund ihrer geologischen Gegebenheiten gezwungen, nach Einlagerungsmöglichkeiten in anderen Gesteinsformationen zu suchen. Mit der Entscheidung für andere Wirtsgesteinstypen in diesen Ländern ist demzufolge keine Negativbewertung der Endlageroption „Salzstock“ verbunden.

So z. B. konzentrierte sich die Standortsuche für ein HAW-Endlager in Frankreich ab Anfang der 1990er Jahre auf Vorkommen toniger und granitoider Gesteine. Möglichkeiten zur Endlagerung im Salz wurden verworfen, weil im Ergebnis früher Phasen des Standortauswahlverfahrens festgestellt wurde, dass die Salzvorkommen Frankreichs aufgrund ihrer geographischen Lage, zu erwartender Nutzungskonflikte wegen der Begrenztheit der Salzvorkommen sowie infolge ihres strukturellen Baus bzw. ihrer Endlagerrelevanten Eigenschaften nicht geeignet sind. Die Festlegung der USA, die für militärische

Altlasten bereits ein HAW-Endlager in permischen Salzschiechten betreibt, ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in einem Tuff zu errichten, hat ihre Ursachen vordergründig in der Abgeschiedenheit und Vornutzung (Kernwaffentestgebiet) des Territoriums sowie in günstigen hydrogeologischen Rahmenbedingungen (Endlagerbergwerk liegt im Gebiet der Wüste Chihuahua deutlich oberhalb des Grundwasserspiegels).

Die Eigenschaften der Wirtsgesteine bestimmen neben den Endlagerkonzepten auch einen Großteil der Standortanforderungen bzw. Auswahlkriterien. So z. B. regelt die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine das Auswahlkriterium Mindestfläche. Die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz im Vergleich zum Ton/Tonstein ist dafür verantwortlich, dass Endlagerbergwerke im Steinsalz einen deutlich geringeren Platzbedarf haben als HAW-Endlager in Tonformationen.

Die Wirtsgesteine Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin sind durch deutliche Unterschiede in den endlagerrelevanten Eigenschaften charakterisiert. Steinsalz ist unter natürlichen Bedingungen nahezu undurchlässig für gasförmige und flüssige Fluide. Es besitzt eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit und visko-plastische Eigenschaften, die einen vollständigen Einschluss von Abfällen ermöglichen. Zudem wird im Steinsalz kein Ausbau der aufgefahrenen Hohlräume benötigt, was zur erheblichen Kostenreduzierung beim Endlagerbau beiträgt. Aufgrund dieser Eigenschaften ist es sehr geeignet für die Endlagerung Wärme entwickelnder hochradioaktiver Abfälle. Salzstöcke gelten aufgrund der Lage und Ausdehnung von Homogenbereichen (kompaktes Steinsalz, meist Hauptsalz der Staßfurt-Folge) als geeigneter als flach lagernde Lagerstätten. Aufgrund der weltweit eingeschränkten Verfügbarkeit geeigneter Salzlagerstätten wird Steinsalz vor allem in Deutschland, aber auch in den USA, Russland, Polen und Belarus als mögliches Wirtsgestein untersucht.

Tonstein kann je nach Genese sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Als Wirtsgestein geeignete Tonsteine besitzen geringe Durchlässigkeiten und hohe Sorptionskapazitäten. Tertiäre plastische Tone und stark deformierte, tektonisch überprägte Tonsteine werden dagegen als nicht geeignet angesehen. Voraussetzung sind ausreichend große Homogenbereiche von Tonsteinen (lateral und vertikal) mit möglichst hohem Tonanteil. Ein Endlager im Tonstein erfordert im Unterschied zum Salz und Kristallin einen Streckenausbau und die Einbringung von geotechnischen Barrieren zum Abschluss von Einlagerungsbereichen. Fortgeschrittene Endlagerprojekte in Tonstein existieren in der Schweiz und in Frankreich.

Kristallingesteine besitzen im ungestörten Zustand sehr gute felsmechanische und hydraulische Barriereigenschaften, die sie als geeignete Wirtsgesteine für die Endlagerung von HAW ausweisen. Die Barrierewirksamkeit wird aber durch eine sehr häufig zu beobachtende Klüftigkeit der Gesteine und die damit verbundenen Wegsamkeiten für Wasser und andere Fluide stark eingeschränkt. Obwohl Kristallingesteine vor allem

auf alten Schilden weit verbreitet sind, können infolge der Klüftigkeit der Gesteine und des weitverbreiteten Vorkommens von tektonischen Störungszonen ausreichend große, geeignete Homogenbereiche nur schwer ausgewiesen werden. Deshalb sind ergänzende geotechnische Barrieren (Abfallbehälter, Bentonitbarriere) wesentliche Bestandteile der Einlagerungskonzepte. Aufgrund der Verbreitung von Kristallingesteinen existieren fortgeschrittene Endlagerprojekte vor allem in den skandinavischen Ländern (Schweden und Finnland). Umfangreiche Forschungsprojekte wurden auch im Felslabor Grimsel (Schweiz) durchgeführt. Bis auf Skandinavien, wo alternative Einlagerungsmöglichkeiten in tief liegenden salzigen oder tonigen Gesteinen fehlen, wurde die Endlagerung in kristallinen Gesteinen aber überwiegend verworfen bzw. besteht nur noch als Reserveoption.

Die Auswahl eines möglichen Standortes für ein HAW-Endlager basiert in einem ersten Schritt auf wirtsgesteinsunabhängigen geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, die von der IAEA formuliert wurden und international anerkannt sind. Im weiteren Verlauf des Auswahlprozesses werden zusätzliche wirtsgesteinsspezifische und konzeptabhängige Anforderungen eingesetzt, die entscheidend von den Eigenschaften der Gesteine bestimmt werden. Für die verschiedenen Wirtsgesteine werden am Beispiel bereits weit fortgeschrittener Auswahlverfahren die dabei eingesetzten Auswahlkriterien beschrieben und die Vorgehensweise im Verlaufe des Standortsuchverfahrens zusammengefasst.

Die Standortauswahlverfahren suchen in allen ausführlicher dargestellten Ländern nicht nach dem am besten geeigneten Standort, sondern nach einem geeigneten, der einerseits den Langzeitsicherheitsrichtlinien entspricht, aber auch sozialpolitische Faktoren berücksichtigt. Die national unterschiedlich ablaufenden Auswahlverfahren werden v. a. durch die speziellen geologischen und sozialökonomischen Verhältnisse geprägt. Eine Analyse der in anderen Ländern praktizierten Vorgehensweisen und der bei der Standortsuche genutzten Entscheidungskriterien offenbart, dass häufig wesentlich pragmatischer und unter Zugrundelegung streng wirtschaftlicher Überlegungen die Auswahlprozedur durchgeführt wurde. So z. B. legten Länder wie Finnland, Schweden, Kanada oder Russland noch vor Beginn oder in einer sehr frühen Phase des Auswahlverfahrens fest, dass die Endlagerstandorte in unmittelbarer Nähe von bereits bestehenden kerntechnischen Anlagen zu errichten sind – in Russland z. B. im Bereich der „Sanitären Schutzzonen“ von Anlagen zur Plutoniumproduktion bzw. zur Wiederaufarbeitung, die meist einen Durchmesser von 20 bis 25 km aufweisen. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen beschränkte sich die Aufgabe des Standortauswahlprozesses in den meisten detailliert betrachteten Ländern auf die Suche nach einem geeigneten Standort in einem lokal begrenzten, vor Beginn des Auswahlprozesses vorgegebenen Raum und wurde nicht auf das gesamte Territorium des Landes ausgedehnt. In vielen Fällen erfolgte die endgültige Standortfestlegung nicht auf der Grundlage eines „objektiven“, kriteriengestützten Vergleichs von alternativen

Standorten, sondern wie z. B. in Frankreich oder in den USA (sowohl für WIPP als auch für Yucca Mountain) durch politische Entscheidungen.

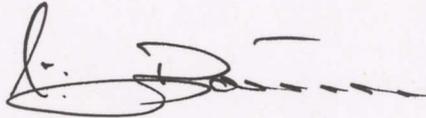
In einer Reihe von Ländern haben zwar formal landesweite Standortsuchverfahren stattgefunden (z. B. Schweden, Finnland, USA), aber meist ist bereits sehr früh durch die Formulierung eines entsprechenden Auswahlkriteriums (Vorfestlegung auf bestimmte Gebiete und/oder Gesteinstypen) die Anzahl der Standortalternativen deutlich reduziert worden. In einigen Standortauswahlverfahren führte die Nutzung des Kriteriums „Nähe zum Abfallproduzenten“ erst in späten Phasen der Auswahlprozedur, d. h. bei der Bewertung detailliert untersuchter, hinsichtlich ihrer Eignung zur Endlagerung ähnlich bewerteter Standortalternativen zum Ausschluss prinzipiell geeigneter Standortregionen (z. B. Russland).

Die Methoden zur Standortsuche und zur Standorterkundung werden in Teil 2 der Abschlußdokumentation zum EUGENIA-Projekt (HAMMER et al. 2009) beschrieben.

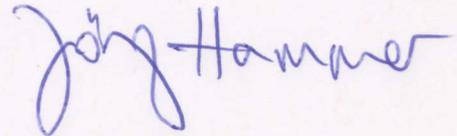
:

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Im Auftrag



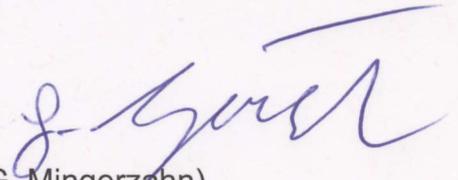
(Dr. V. Bräuer)
- Direktor und Professor -
Abteilungsleiter B3
Projektleiter Endlagerung



(Dr. J. Hammer)
- Geologieoberrat -



(J. Sönke)
- Geologierat -



(G. Mingerzahn)
- Geologieoberrat -

Literaturverzeichnis

- AkEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd.-- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): 260 S., 30 Abb., 14 Tab., 3 Anh.; Berlin.
- ANDERSON, E. B., DAZENKO, V. M., KEDROVSKIJ, O. L. et al. (1993): Geologische Untersuchungen auf dem Territorium des Südteils des Jennissejsker Höhenrückens als Begründung für die Möglichkeit einer sicheren Endlagerung verfestigter hochaktiver Abfälle des Werkes RT-2 in tiefen geologischen Formationen (Verallgemeinerung und Analyse der Literatur, von Archivunterlagen und von Resultaten feldgeologischer Erkundungsarbeiten) (russ.). – unveröff. Bericht; Chlopin-Institut, St. Petersburg.
- ANDERSON, E. B., VELITSCHKIN, V. I., DAZENKO, V. M. et al. (1996): Geologisch-geophysikalische Untersuchung des Nordteils des Nischnekansker Massivs mit dem Ziel der Suche von monolithischen Granitoidblöcken mit Perspektiven für die Endlagerung verfestigter hochaktiver Abfälle des Werkes RT-2 (russ.). – unveröff. Bericht ; Chlopin-Institut, St. Petersburg.
- ANDRA (1991): La Recherche De La Gestion Des Déchets Radioactifs - Loi du 30 Décembre 1991.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Collection Les Essentielles: 7 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (1997a): Underground Research Laboratory - East of France - State of knowledge and experimental program.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Informationsbroschüre: 34 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (1997b): Underground Research Laboratory - Gard - State of knowledge and experimental program.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Informationsbroschüre: 34 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (1997c): Underground Research Laboratory - Vienne - State of knowledge and experimental program.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Informationsbroschüre: 33 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (1999): Actes des journées scientifiques Andra 1997: Etude du Massif de Charroux-Civray: Bar-le- Duc, 13–14 octobre 1997. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Châtenay-Malabry, France.

- ANDRA (2001): Dossier 2001 Argile - Sur l'avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à la vie longue en formation profonde.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Rapport de synthese - Partie A: 159 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005a): Dossier 2005 Granite. Synthesis - Assets of granite formations for deep geological disposal.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): 159 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005b): Dossier 2005 Granite. Tome - Phenomenological evolution of a deep geological repository.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): 196 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005c): Dossier 2005 Argile. Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Tome 1: Le site de Meuse/Haute: histoire géologique et état actuel C.RP. ADS.04.0022.B: 713 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005d): Dossier 2005 Argile. Synthèse - Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): 239 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2006): Matières et Déchets Radioactifs - Loi de Programme du 28 Juin 2006.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Collection Les Références: 18 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2007): Recherches Et Etudes Sur Le Stockage Et L'Entreposage Des Dechets De Haute Activite Et De Moyenne Activite A Vie Longue - Plan De Developpement Projet HAVL - Résumé.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Sciences et Techniques 306/B: 20 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANTTILA, P. et al. (1999): Final disposal of spent fuel in Finnish bedrock – Olkiluoto site report. Posiva Oy, Report POSIVA 99-10.
- ASK D. (2003): Evaluation of measurement-related uncertainties in the analysis of over-coring rock stress data from Äspö HRL, Sweden: a case study // Inter. J. Rock Mech. Min. Sci. 2003. № 40: P. 1173–1187.

- ATG (1959): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) - „Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. März 2009 (BGBl. I S. 556) geändert worden ist“.
- BAARTMANN, J.C. & JACOBSEN, F.L. (1980): Geology of salt domes in North Jutland. In: Proceedings Radioactive waste disposal Symp.. Geology and site investigations 1979: 49-73, 10 Abb.; ELSAM & ELKRAFT; Copenhagen.
- BÄUERLE, G. (2000): Geochemisch-mineralogische Untersuchungen zur Genese, Lösungs- und Gasführung der Gorleben-Bank (Zechstein 3) im Salzstock Gorleben.-- Univ. Clausthal, Diss.: 237 S., 32 Abb., 27 Tab., 27 Anl., 24 Taf.; Clausthal-Zellerfeld. BFE (2008): Sachplan Geologisches Tiefenlager - Konzeptteil.-- Bundesamt für Energie (BFE): 92 S.; Bern/Schweiz.
- BEST, G., BORNEMANN, O., KOCKEL, F. & LEYDECKER, G. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern.-- BGR, unveröffentl. Ber., 92433: 48 S., 6 Anl., 1 Anh.; Hannover.
- BfS (2002): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000. — BGR, unveröffentl. Ber.: Bundesamt für Strahlenschutz: 1183 S., 47 Abb., 16 Tab., 4 Anl.; Salzgitter.
- BfS (2005): Transport/Lagerung – Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- BGR (2006):): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. BGR-Bericht: 17 S.; Hannover.
- BGR (2007): Nuclear Waste Disposal in Germany. Investigation and evaluation of regions with potentially suitable host rock formations for a geologic nuclear repository. BGR.-- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), BGR-Bericht: 17. S.; Hannover.
- BLOMEKE, J.E., BOEGLY, W.J.Jr. et al. (1963): Disposal in natural salt formations. In: Union Carbide Corporation, Oak Ridge National Laboratory, Report no. ORNL-3492: 19-37.

- BORK, M., KINDT, A., NIERSTE, G. & WALTERSCHEIDT, K.-H. (2001): Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. GRS-A-2834. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit.
- BORNEMANN, O., FISCHBECK, R & BÄUERLE, G. (2000): Investigations of deformation textures of salt rock from various Zechstein units and their relationship to the formation of the salt diapirs in NW Germany.- Salt 2000, 8th World Salt Symposium, 1: 89-94; Amsterdam, Elsevier.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G. & SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil III. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Landesamt für Bergbau, Energie u. Geologie.--, Geol. Jb., C **73**: 211 S., 50 Abb., 7 Tab., 5 Anl.; Stuttgart (Schweizerbart) - ISBN 978-3-510-95963-1.
- BOSSART, P. & THURY, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Bossart, P., THURY, M.-- Swiss Geological Survey (SGS), **3**: 194 S.; Wabern/Schweiz - ISBN 978-3-302-40016-7.
- BRACE W. F. (1980): Permeability of crystalline and argillaceous rocks: Status and problems // Int. Journ. Rock Mechanics.. V. 17: P. 241-251.
- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P., SCHUSTER, P. & SPRADO, K. H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. – BGR-Bericht: 147 S.; Hannover.
- BRÄUER, V. et al. (in Vorb.): Standortbeschreibung Gorleben Teil IV. Geotechnische Erkundung, Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.; Hannover.
- BRADSHAW, R.L., BOEGLY, W.J.Jr. et al. (1963): Ultimate storage of high-level waste solids and liquids in salt formations. In: Treatment and storage of radioactive waste. Proceed. of a symposium, Vienna, Austria 1962, IAEA, Vienna (1963): 153-175.
- BROOKINS D.G. (1984): Geochemical aspects of Radioactive Waste disposal. NY.: 347 p.; Springer-Verlag.

- CCE (1992): Endlagerung radioaktiver Abfälle: Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers. Serie "Euradwaste", Nr. 6, EUR 14598 DE. Kommission der Europäischen Gemeinschaften (CCE), Luxemburg.
- CNE (1995): Rapport d'évaluation No. 1. Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), Paris, France.
- CNE (1996): Rapport d'évaluation No. 2. Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), Paris, France.
- CNE (1997): Rapport d'évaluation No. 3. Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), Paris, France.
- CNE (1999): Commission Nationale D'Evaluation Relative Aux Recherches Sur La Gestion Des Dechets Radioactifs - Rapport d'évaluation N°5: 100 S.; Paris.
- CNE (2001): Commission Nationale D'Evaluation Relative Aux Recherches Sur La Gestion Des Dechets Radioactifs - Rapport d'évaluation N°7: 119 S.; Paris.
- CNE (2006): Commission Nationale D'Evaluation Relative Aux Recherches Sur La Gestion Des Dechets Radioactifs - Rapport global d'évaluation: 38 S.; Paris.
- CNE (2007): Commission Nationale D'Evaluation Relative Aux Recherches Sur La Gestion Des Dechets Radioactifs - CNE 2 - Rapport d'évaluation N°1: 30 S.; Paris.
- CNE (2008): Commission Nationale D'Evaluation Relative Aux Recherches Sur La Gestion Des Dechets Radioactifs - CNE 2 - Rapport d'évaluation N°2: 86 S.; Paris.
- Deutsche Atomkommission (DAK) (1961): Protokoll der 23. Sitzung des Deutschen Atomkommission-Arbeitskreises III/IV-1 vom 7.07.1961.
- DSIN (1991): Basic Safety Rule n°RFS.III.2f., "determination of the objectives to be adopted in the design and construction phases of the creation of a deep geological formation radioactive waste repository to ensure safety after the repository has been closed ", DSIN, June 1991.
- ENRESA (1996): El Berrocal Project: Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment. Geological studies. V. 1; Madrid, Spain.

- EPA (2005): EPA's Proposed Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain.- EPA Yucca Mountain Fact Sheet 2, EPA 402-F-05-026, October 2005.
- FILBERT, W. & ENGELMANN, H. J. (1998) : Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben", Abschlußbericht; DBE 1998.
- FILBERT, W. et al. (2004): Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST). Abschlußbericht, DBE Technology GmbH.
- FISCHBECK, R. & BORNEMANN, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen. Geol. Jahrbuch, A 142, 233-256, 5 Abb., 9 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- FZKA (2008): 40 Jahre Forschung und Entwicklung für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Wo stehen wir? Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Wiss. Ber. FZKA-PTE Nr. 11; Karlsruhe.
- HAMMER, J. & SÖNNKE, J. (2009): Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Eugenia Abschlussbericht – Teil 2. unveröff. Bericht, BGR, Hannover.
- HERRMANN, A.G. & RÖTHEMEYER, H. (1998): Langfristig sichere Deponien – Situation, Grundlagen, Realisierung. 466 S., 54 Abb., 61 Tab.; Springer (Berlin).
- HERRMANN, A. G., BORNEMANN, O., BRENNER, A., KUTOWSKI, J., MAROTZKE, R. & STIER-FRIEDLAND, G. (2002): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung Datenerfassung bis 30.09.2000.-- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): 1183 S., 47 Abb., 16 Tab., 4 Anl.; Salzgitter.
- HOFRICHTER, E. (1966): Bericht zur Tagung „Endbeseitigung und Tief Lagerung radioaktiver Rückstände“, 15.03.1966, Essen. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung, Archiv-Nr. 0023224: 7 S.; Hannover.
- HOFRICHTER, E. & LANGER, M. (1969): Geologische Voraussetzungen für behälterlose Speicherung in Salzkavernen. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Archiv-Nr. 0027248: 10 S., 6 Anl.; Hannover.

- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007):
Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen
Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.
BGR, 118 S., 44 Abb., 5 Tab.; Berlin/Hannover.
- HSK (1986): Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für
die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). HSK 23/28. Hauptabteilung für die
Sicherheit der Kernanlagen (HSK); Würenlingen, Schweiz.
- HSK (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. HSK Richtlinie
R-21/d. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK);
Würenlingen, Schweiz.
- HSK (2001): Kurzer Überblick über das Auswahlverfahren eines Sedimentstandortes
für die Endlagerung hochaktiver Abfälle. HSK 23/62. Hauptabteilung für die
Sicherheit der Kernanlagen (HSK); Würenlingen, Schweiz.
- HSK (2004): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-1 der NAGRA. HSK –
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK 23/73 (2004): 110 S.;
Würenlingen, Schweiz.
- HSK (2007): Sachplan geologische Tiefenlager. Herleitung, Beschreibung und
Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation.
Schweizerische Eidgenossenschaft. Hauptabteilung für die Sicherheit der
Kernanlagen HSK, HSK 33/001: 52 S.; Villingen, Schweiz,
- IAEA (1977): Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing
wastes in geologic formations. IAEA Technical Report Series № 177: 64 p.;
Vienna.
- IAEA (1990): Sicherheitsprinzipien und technische Kriterien für die unterirdische
Endlagerung radioaktiver Abfälle mit hoher Aktivität (engl.). IAEA, Ser.
Sicherheit, Nr. 99: 32 p.; Wien.
- IAEA (1994): International Atomic Energy Agency (1994): Siting of Geological Disposal
Facilities - A Safety Guide, IAEA Safety Series No. 111-G-4.1; Vienna.
- JANACZEK, J. & WŁODARSKI, J. (2000): Site selection and concept of a radioactive waste
repository in deep geological formations. Bezpieczeństwo Jadrowe i Ochrona
Radiologiczna (Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki), 41 1:
S. 29-48.

- JANACZEK, J. & WŁODARSKI, J. (2001): The Polish concept of radioactive waste disposal. In: Witherspoon, P.A. & Bodvarsson, G.S. (ed.): Geological challenges in radioactive waste isolation. Third worldwide Review, 205-208, 2 Abb..
- JARITZ, W. (1972): Eine Übersichtskarte der Tiefenlage der Salzstöcke in Nordwestdeutschland. Geol. Jb. 90: 241-244, 1 Taf.; Hannover.
- JARITZ, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. Geol. Jb., Reihe A, Heft 10: 77 S., 3 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Hannover.
- JARITZ, W. (1981): Vorkenntnisse über den Salzstock Gorleben und Gründe für die Annahme als Untersuchungsobjekt für den Bund. In: Entsorgung. Bericht Info-Veranstaltung „Energiedialog Bundesregierung. Zwischenbericht zum Salzstock Gorleben“: 11-19; Bonn.
- JARITZ, W. (1983): Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. unveröff. Bericht, BGR, Archiv-Nr. 0094770: 105 S., 2 Tab., 1 Anl.; Hannover.
- JOBMANN, M., AMELUNG, P., BILLAUX, D., POLSTER, M., SCHMIDT, H., UHLIG, L. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein, F+E-Vorhaben GENESIS, Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY, Peine.
- JOCKWER, N. (1981): Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. — GSF, Inst. F. Tieflagerung, GSF-Bericht T119: 134 S.; Braunschweig.
- JOSHI, A.V. (1981): Results of geological investigations of the Mors Salt dome for the disposal of high level radioactive waste in Denmark. In: OECD Workshop on siting of radioactive waste repositories in geological formations: S. 1-17, 14 Abb.; Paris.
- KBB (1974): Geologisch-topographische Vorstudie zur Standortvorauswahl für ein Speicherprojekt der KEWA - Zusammenstellung und Bewertung geologischer und topographischer Daten von Salzstöcken in Norddeutschland für den Bau von Kavernen, Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft mbH: 44 S. 1 Anl.; Hannover.

- KBB (2007):): Compilation of geological and geotechnical data of worldwide domal salt deposits and domal salt cavern fields. KBB Underground Technologies: 100 S.; Hannover.
- KEDROVSKIJ, O.L. (1992): Nutzung des unterirdischen Raumes für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.). In: Untertage- und Schachtbau (russ.), Heft 2: 2-7; Moskau.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz vom 21.03.2003. KEG (Stand am 1. Januar 2009), Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1; Schweiz.
- KELLER, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Unveröff. Ber., BGR: 24 S., 5 Abb.; Hannover.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung vom 10.12.2004. KEV (Stand am 1. Januar 2009), Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11; Schweiz.
- KERN, H. & FRANKE, J.-H. (1986): Carnallit – thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. Z. dt. geol. Ges. 137, 1, 1-27, 7 Abb., 1 Tab., 4 Taf..
- KERN, H., POPP, T. & TAKESHITA, T. (1992): Characterization of the thermal and thermo-mechanical behaviour of polyphase salt rocks by means of electrical conductivity and gas permeability measurements. Tectonophysics 213, 3-4: 285-302, 1 Tab.
- KEWA GmbH (1974): Ermittlung mehrerer alternativer Standorte in der Bundesrepublik Deutschland für eine industrielle Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungsanlage (vom BMFT gefördert), KEWA-Zwischenbericht über den Berichtszeitraum vom 1.1. – 31.12.1976; Frankfurt/M.-Höchst.
- KEWA- Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungsgesellschaft (Hrsg.) (1977): Untersuchung eines Standortes zur Errichtung einer Anlage für die Entsorgung von Kernkraftwerken, Teiluntersuchungen zu zwei Alternativstandorten, Leopoldshafen-Eggenstein, KWA 1225. Zwischenbericht (1977).
- KLINGE, H., BÖHME, J., GRISSEMANN, C., HOUBEN, G., LUDWIG, R. R., SCHELKES, K., SCHILDKNECHT, F., SUCKOW, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil I. Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geol. Jb., C 71: 147 S., 59 Abb., 4 Tab., 1 Anl.; Stuttgart (Schweizerbart) - ISBN 978-3-510-95963-1.

- KOCKEL, F. & ROLAND, N.W. (1977): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle. Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland. unveröff. Bericht, BGR, Archiv-Nr. 0078512: 42 S., 13 Abb., 22 Tab.; Hannover.
- KOCKEL, F. & KRULL, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Unveröff. Bericht BGR: 48 S., 4 + 1 Anl., 5 Abb., 16 Tab.; Hannover, Berlin.
- KRAUSKOPF (1986): Thorium and rare-earth metals as analogs for actinide elements. Chem. Geol. 55: 323-335.
- KRAUSKOPF (1988): Geology of high-level nuclear waste disposal. Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 16: 173-200.
- KRULL, P. (1991): Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. BGR, unveröffentl. Ber., Archiv-Nr. 2024209: 133 S., 7 Abb., 7 Tab., 3 Anl.; Berlin.
- KRULL, P., HOTH, P., BRÄUER, V. & WIRTH, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – untersuchungswürdige Regionen mit potenziellen Wirtsgesteinsformationen. Unveröff. Bericht BGR: 91 S.; Hannover, Berlin.
- LAPOTSHKIN, B.K. (1997): Geoökologische Perspektiven des salzhaltigen Beckens im Umfeld von Moskau für die sichere Endlagerung fester hochradioaktiver Abfälle (russ.). Razvedka i ochrana nedr: 28-31, 1 Abb., 2 Tab.; Moskau.
- LAPOTSHKIN, B.K. (1998): Geoökologische Probleme der Endlagerung fester radioaktiver Abfälle des europäischen Nordens Russland (russ.). In: Ökologie der industriellen Produktion (russ.), 1-2: 35-41, 2 Abb., 2 Tab.; Moskau.
- LAVEROV, N. P., OMELJANENKO, B. I. & VELITSCHKIN, V. I. (1994): Geologische Aspekte des Problems der Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.). Geokologija 6: 3 – 20.
- LAVEROV, N. P., VELITSCHKIN, V. I. & OMELJANENKO, B. I. (2001): Isolationseigenschaften der kristallinen Gesteine in Verbindung mit dem Problem der Endlagerung hochaktiver Abfälle (russ.). – Geologija rudnych mestoroschdenij, 43: 6-23; Moskau.

- LAVEROV, N. P., PETROV, V. A., VELITSCHKIN, V. I., POLUEKTOV, V. V. et al. (2002): Petrophysikalische Eigenschaften der Granitoide des Nischnekansker Massivs: zur Frage der Auswahl von Gebieten für die Isolation von HAW und abgebrannten Kernbrennstäben (russ.). – *Geoekologija*, 4: 293-310; Moskau.
- LAVEROV, N.P., PETROV, V.A., POLUEKTOV, V.V., NASIMOV, R.M., HAMMER, J., BURMISTROV, A.A. & SCHUKIN, S.I. (2008): Uranlagerstätte Antej - natürliches Endlager-Analogon und geodynamisches Untertagelabor in Graniten (russ.). *Geologija rudnych mestoroshdenij* 50 im Druck.
- LÜTTIG, G. & WAGER, R. (1974): Feasibility-Studie über präsumtive Standorte einer Wiederaufbereitungsanlage für Kernbrennstoffe. unveröff. Studie, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLFb: 40 S., 18 Anl.; Hannover.
- LUX, K.-H. & DÜSTERLOH, U. (2003): Geologische und geotechnische Barrieren – Gedanken zur Nachweisführung. In: Kühn, K. (Hrsg.): Clausthaler Koll. zur Endlagerung: 89-120, 22 Abb.; Clausthal-Zellerfeld.
- MACFARLANE, A. M. & EWING, R. C. (eds.) (2006): *Uncertainty Underground - Yucca Mountain and the Nation's High-Level Nuclear Waste*: 431 p.; MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England.
- MARTINI, H.J. (1963): Bericht zur Frage der Möglichkeiten der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung im Auftrag des BMWF, 15.05.1963 Archiv-Nr. 0023217: 24 S., 6 Einzeldarstellungen, 4 Anl.; Hannover.
- MAZUREK, M. (1998): Geology of the crystalline basement of Northern Switzerland and derivation of geological input data for safety assessment models. *Nagra Tech. Rep. NTB 93-12*; Schweiz.
- MAZUREK, M., PEARSON, F.J., VOLCKAERT, G. & BOCK, H. (2003): Features, Events and Processes evaluation catalogue for argillaceous media. *Nuclear Energy Agency Report NEA 4437*. OECD/NEA: 376 pp.; Issyles-Moulineaux, France.
- McEWEN, T. & ÄIKÄS, T. (2000): The site selection process for a spent fuel repository in Finland – summary report. *Posiva-Report*, Posiva Oy, Posiva 2000-15: 224 S.; Helsinki.

- MILNES, A. G., BUSER, M. & WILDI, W. (1980): Endlagerkonzepte für radioaktive Abfälle im Überblick. Ztschr. dt. geol. Ges. **131**: 359-385.
- MOROZOV, V.N., KOLESNIKOV, I.J., BELOV, S.V. & TATARINOV, V.N.: Spannungs-/ Deformationszustand des Nischnekansker Massives als Gebiet einer möglichen Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.). Geoekologija 6; Moskau.
- MÜLLER, W.H. (1988): The Grimsel Test Site: Geological background of the area and specific aspects of water flow. NAGRA Bull. 1988: p. 13–22; Schweiz.
- NAGRA (1985): Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. Nagra. Nagra Projektbericht NGB 85-01/09; Wetztingen/Schweiz.
- NAGRA (1991): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1990: Zusammenfassende Uebersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen. NAGRA Technischer Bericht NTB 91-19; Wetztingen/Schweiz.
- NAGRA (1994a): Geology and hydrogeology of the crystalline basement of Northern Switzerland – Synthesis of regional investigations 1981 – 1993 within the Nagra radioactive waste disposal programme. Nagra Technischer Bericht NTB 93-01; Wetztingen/Schweiz.
- NAGRA (1994b): Kristallin-I. Safety Assessment Report. Nagra Technischer Bericht NTB 93-22; Wetztingen/Schweiz.
- NAGRA (1994c): Sedimentstudie - Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990-1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. Nagra Technischer Bericht NTB 94-10; Wetztingen/Schweiz.
- NAGRA (1994d): Felslabor Grimsel – Bohrlochkranzversuch: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in geklüftetem Fels. Nagra Technischer Bericht NTB 94-02: 170 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover).
- NAGRA (1994e): Kristallin-I – Results in Perspective. Nagra Tech. Rep. NTB 93-23; Wetztingen/Schweiz.
- Nagra (1995): Felslabor Grimsel – Der Einfluss der Stollen-Ventilation auf die hydraulischen Fließverhältnisse im ausbruchsnahen Gebirgsbereich (Kristallin). NAGRA Technischer Bericht NTB 94-04: 90 S.; GSF München.

- NAGRA (1999): Grimsel Test Site – Investigation Phase V (1997-2002). Conclusions of the tunnel near-field programme (CTN). Nagra Technischer Bericht NTB 99-07: 120 S.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2001): Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra–JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock NAGRA Technischer Bericht NTB 00-09; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2001a): Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra–JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock NAGRA Technischer Bericht NTB 00-09; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2001b): NTB 00-01 «Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 00-01. Textband, 290 S. u. Beilagenband 70 S.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2001c): 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. NAGRA Technischer Bericht NTB 00-03: 180 S.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2002a): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.- Nagra, NTB 02-03: 659 S.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2002b): Project Opalinus Clay - Safety Report. "Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis)". NAGRA, NTB 02-05: 360 S., 120 Fig., 73 Tab., 5 App.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2002c): Projekt Opalinuston - Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. NAGRA Technischer Bericht NTB 02-02: 150 S.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2005): Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle. Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtsgesteine und Gebiete. Nagra, NTB 05-02: 94 S.; Wettingen/Schweiz.

- NAGRA (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Technischer Bericht NTB 08-03; Wettingen, Schweiz.
- NAGRA (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nagra Technischer Bericht NTB 08-04; Wettingen, Schweiz.
- NAGRA (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Nagra Technischer Bericht 08-05; Wettingen, Schweiz.
- NEALL, F., SMITH, P., SUMERLING, T. & UMEKI, H. (1995): Die Sicherheitsanalyse des Schweizer HAA-Endlagers im internationalen Vergleich. Nagra Informiert 25: 47–55; Schweiz.
- NEALL, F.B. & SMITH, P.A. (eds.) (2004): H12: Examination of safety assessment aims, procedures and results from a wider perspective. JNC Report TY1400 2004-001; Tokai, Japan.
- NOWAK, T. & WEBER, J. (2002): Projekt Gorleben – Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben. Abschlussbericht zum AP 9G4151110000, BGR, unveröffentl. Ber., Archiv-Nr. 0123070: 122 S., 57 Abb., 16 Tab.; Hannover.
- NRC (1996): Siting Criteria. In: Code of Federal Regulations, Title 10, Part 60, Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories. 10 CFR Part 60, § 60.122.
- NUMO (2004): Evaluating site suitability for a HLW repository: Scientific background and practical application of NUMO's siting factors. Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), NUMO-TR-04-04; Tokyo, Japan.
- OECD (2003): The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. An International Peer Review of the „Dossier 2001 Argile“. OECD/NEA, Report NEA No. 6178: 76 P.; Paris – ISBN 92-64-18260-8.
- OECD (2006): Safety of Geological Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste in France. An International Peer Review of the „Dossier 2005 Argile“. OECD/NEA, Report NEA No. 6178: 77 P.; Paris - ISBN 92-64-02299-6.

- PAHL A., HEUSERMANN ST., BRÄUER V. & GLÖGGLER W. (1989): Grimsel Test Site: Rock stress investigations. BGR - Nagra Rep. NTB 88–39E; Hannover.
- PAPP, R. (Hrsg.) (1997): Geisha – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Wiss. Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, FZKA-PTE Nr. 3.
- PETROV, V. A. (2001): Untersuchungen der petrophysikalischen Eigenschaften und des Spannungs-Deformations-Zustandes der Gesteine im Gebiet der PO "Majak" und des GChK in Verbindung mit der Auswahl von Polygonen für die Isolation von HAW (russ.). – Geologija rudnych mestoroschdenij, 43, 6: 478-494; Moskau.
- PETROV, V.A., LESPINASSE, M. & HAMMER, J. (2008): Tectonodynamics of fluid-conducting structural elements and migration of radionuclides in massifs of crystalline rocks. Geology of ore deposits, Pleiades Publ. Ltd., New York, 50 (2008) 2: 89-111, 12 Abb..
- PIERCE, W.G. & RICH, E.I. (1962): Summary of rock salt deposits in the United States as possible storage sites for radioactive waste materials. US Geol. Survey, Bull.: 1148.
- POSIVA (2009): Olkiluoto site description 2008. Posiva Oy, Report POSIVA 2009-01; Helsinki, Finland.
- POWERS, D.W., LAMBERT, S.J., SHAFFER, S.-E., HILL, L.R. & WEART, W.D. (eds.) (1978): Geological characterization report, Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) Site, Southeastern New Mexico. Sandia National Laboratories, SAND78-1596; Albuquerque, New Mexico, USA.
- POWERS, D.W. (2007): Waste Isolation Plant – Candidate Site Geology.
- PUSCH, R. (2008): Geological Storage of Radiactive Waste – Current Concepts and Plans for Radioactive Waste Disposal: 379 S.; Springer, ISBN 978-3-540-77332-0.
- REMPE, N. T. (2008): Eight years WIPP progress. Proceed. RepoSafe 2007, Braunschweig, GRS & BfS: 81-87, 4 Abb..
- RGD (1993): Evaluation of salt bodies and their overburden in the Netherlands for the disposal of radioactive waste. 5 volumes, Rijks Geologische Dienst; Haarlem, Netherlands.

- RHÉN, I., BÄCKBORN, G., GUSTAFSON, G., STANFORS, R. & WIKBERG, P.: Äspö HRL Geoscientific evaluation (1997): Results from pre-investigations and detailed site characterization. Svensk Kärnbränslehantering AB, Summary report. TR 97-03.; Stockholm.
- RICHTER-BERNBURG, G. & HOFRICHTER, E. (1964): Projekte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in ausgesolten Kavernen. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung, Archiv-Nr. 0023216: 14 S., 7 Einzeldarstellungen, 12 Anlagen; Hannover.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1966): Vermerk zur Frage der unterirdischen Einlagerungsmöglichkeiten von Energieträgern oder Abfallstoffen im Bereich der unteren Weser. unveröff. Bericht, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung-NLfB, Archiv-Nr. 0010407: 2 S., 1 Anl.; Hannover.
- RICHTER-BERNBURG, G. (1972): Bericht über geologische Möglichkeiten zur Anlage unterirdischer Rohölspeicher in der BRD außer Norddeutschland. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung, Archiv-Nr. 007496: 14 S., 1 Tab., 6 Anl.; Hannover.
- SCHRAMM, M., KÜHNLENZ, T., MINGERZAHN, G. & HAMMER, J. (2009): Projekt Gorleben. Lösungen im Salzstock Gorleben. Unveröff. Bericht; BGR Hannover.
- SCHUBERT, S. & HOFRICHTER, E. (1978): Konzept des NEZ-Endlagers für radioaktive Abfälle im Salzstock am geplanten Standort. unveröff. Bericht, Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Archiv-Nr. 79075: 28 S.; Hannover.
- SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N. (2003): Parameter aus Untertagelabors und ihre Verwendung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle an alternativen Standorten in Deutschland (UTL-Parameter für alternative Standorte. 1. Zwischenbericht: Untertagelabors und Aufbau einer Datenbank). Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): 100 p., 37 Abb., 14 Tab.; Salzgitter.
- SCHULZE, O. (1985): Untersuchung der thermomechanischen Eigenschaften radioaktiv bestrahlter Salzproben. Abschlussbericht, BGR; Hannover.
- SKB (1998): R&D-Programme 98: Treatment and final disposal of nuclear waste. Programme for research, development and demonstration of encapsulation and geological disposal. Svensk Kärnbränslehantering AB; Stockholm, Schweden.

- SKB (1999): Deep repository for spent nuclear fuel: SR 97: Post-closure safety. Tech. Rep. TR 99-06. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB); Stockholm, Sweden.
- SKB (2005): Site investigation Oskarshamn. Annual Report 2005. Svensk Kärnbränslehantering AB; Schweden.
- SKB (2006): Site investigation Oskarshamn. Annual Report 2006. Svensk Kärnbränslehantering AB; Schweden.
- SKB (2006a): Site investigation Oskarshamn. Annual Report 2005. Svensk Kärnbränslehantering AB: 109 S.; Schweden.
- SKB (2006b): Preliminary site description Laxemar stage 2.1 - Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. Svensk Kärnbränslehantering AB, Östhammar, Report R-06-110; Sweden.
- SKB (2007): Site investigation Forsmark. Annual Report 2006 Svensk Kärnbränslehantering AB: 127 S.; Östhammar, Sweden.
- SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-08-05; Östhammar, Sweden.
- SKI (2001): SKI's and SSI's joint review of SKB's Safety Assessment Report, SR 97: Review Report. SKI Report 01:4 / SSI Report 01-03. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI); Stockholm, Sweden.
- SKI (2002): The Swedish Nuclear Power Inspectorate's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear materials and nuclear waste. Inspectorate Regulatory Code SKIFS 2002:1. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI); Stockholm, Sweden.
- SMELL J.A.T. & ROSBOLT J.N. (1984): Radioactive disequilibria in mineralized fracture samples from two uranium occurrences in northern Sweden. Lithos 17: 215-225.
- SMELLIE J.A.T. & KARLSSON F. (1999): The use of natural analogues to assess radionuclide transport. J. Engineer. Geol. № 52: 193–220.

- STRUXNESS, E.G. (1963): Storage of radioactive waste in mine cavities. In: Bersticker, A.C. (Ed.): Symposium on salt - Abstracts. Northern Ohio Geol. Society, Inc.: p. 412; Cleveland, Ohio.
- TALBOT C.F. & SIRAT, M. (2001): Stress control of hydraulic conductivity in fracture-saturated Swedish bedrock. J. Engineer. Geol. № 61: 145–153.
- TVO (1985): Safety assessment. The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste. Wiley and Sons, Chichester.
- TVO (1993): TVO-92 Safety analysis of spent fuel disposal. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. Report YJT-92-33E.
- THEIS, C.W. (1956): Problems of ground disposal of nuclear wastes. In: United Nations (ed.): Proceedings of the Internat. Confer. on the peaceful uses of atomic energy, Reactor technology and chemical processing, Vol. 9: 679-683; New York.
- TRUSHEIM, F. (1957): Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. Z. dt. geol. Ges., 109: 111-158; Hannover.
- VIENO, T. & NORDMAN, H. (1999): Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara: TILA-99. Posiva Oy, Posiva Report 99-07; Helsinki, Finland.
- VIENO T., LEHIKOINEN J., LÖFMAN J. et al. (2003): Assessment of disturbances caused by construction and operation of ONKALO. Olkiluoto, Posiva Oy Rep. 2003–06; Finland.
- VIRA, J. (2008): Preparing for licensing: progress in underground rock characterisation of Olkiluoto bedrock in Finland. Proceed. RepoSafe 2007, Braunschweig, GRS & BfS: 44-51, 3 Abb..
- ZIRNGAST, M. (1985): Dynamik des Salzstocks Gorleben. BGR, unveröffentl. Ber., BGR, Archiv-Nr. 97673: 53 S., 10 Abb., 29 Anl.; Hannover.
- WAGER, R. & RICHTER, W. (1960): Disposal of radioactive waste in the Federal Republic of Germany. Geological and hydrogeological problems. In: Proceedings of the Scientific Confer. on the disposal of radioactive wastes sponsored by the IAEA and the UN Educational, Scientific and Cultural Organisation with the cooperation of the Food and Agricultural Organisation of the UN. Monaco, Oceanographic Museum, 16.-21.12.1959: 368-384; Wien.

WITHERSPOON, P.A. & BODVARSSON, G.S. (Eds.) (2001): Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review. LBNL-49767. Lawrence Berkeley National Lab.; USA.

WITHERSPOON, P.A. & BODVARSSON, G.S. (2006): Geological challenges in radioactive waste isolation. Fourth worldwide review. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; USA.

YOSHIDA H., AOKI K., SEMBA, T. et al. (2000) : Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi Mine: relevance to radioactive waste disposal in Japan. J. Engineer. Geol. 2000. N 56. P. 151-162.

Abkürzungsverzeichnis

AEC	Atomic Energy Commission
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Nationale Gesellschaft für die Behandlung radioaktiver Abfälle, Frankreich).
APA	Administrative Procedure Act
ASN	l'Autorité de Sûreté Nucléaire
AtG	Atomgesetz
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMwF	Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CBFO	Carlsbad Field Office
CCA	Compliance certification application
CCE	Kommission der Europäischen Gemeinschaften (CCE)
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique (Frankreich)
CFR	Code of Federal Regulations
CLAB	Zentrales Zwischenlager
CNE	Commission Nationale D'Évaluation (Frankreich)
DAK	Deutsche Atomkommission

DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DoE	US Department of Energy
DSIN	Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires
EDZ	Excavation damaged zone (Auflockerungszone im Streckennahbereich)
EEG	Environmental Evaluation Group
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (Spanien)
EPA	Environmental Protection Agency
EU	Europäische Union
EUGENIA	Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GIS	Geo-Informationssysteme
GOK	Geländeoberkante
GSF	Gesellschaft für Strahlenforschung
HAW	Hochradioaktiver Abfall (high active waste)
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (Schweiz)
KBB	Kavernen Bau- und Betriebs- GmbH
KBS-3	Schwedisches Endlagerkonzept
KEG	Kernenergiegesetz (Schweiz)

KEV	Kernenergieverordnung (Schweiz)
KEWA	Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungs-Gesellschaft
KKW	Kernkraftwerk
KSA	Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (Schweiz)
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NAS	National Academy of Sciences
NATO	North Atlantic Treaty Organization (Nordatlantische Vertragsorganisation)
NEA	Nuclear Energy Agency (Organisation der OECD)
NEZ	Integrierter Nuklearer Entsorgungszentrum
NLFB	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
NMED	New Mexico Environmental Department
NRC US	Nuclear Regulatory Commission
NTB	Nagra Technischer Bericht
NUMO	Nuclear Waste Management Organization of Japan
NWPA	Nuclear Waste Policy Act
OCRWM	Office for Civilian Radioactive Waste Management
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organization for Economic Co-operation and Development)
OECD/NEA	Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency
ONKALO	Untertagelabor (Finnland)
ORNL	Oak Ridge National Laboratory

PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RFS	Règle fondamentale de sûreté (l'Autorité de sûreté nucléaire)
RGD	Rijks Geologische Dienst
SDWA	Safe Drinking Water Act
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schwedische Kernbrennstoff- und Abfallmanagement Co.)
SKI	Swedish Nuclear Power Inspectorate
SMA	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
STUK	Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority
THMC	Mehrkomponentenmodell, das thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse berücksichtigt
TRU	Transuranic radioactive waste
TSPA-SR	Total Performance Assessment for Site Recommendation
TVO	Teollisuuden Voima Oy
URL	Untertagelabor
USA	United States of America
USGS	US Geological Survey
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant; Endlager der USA für TRU-Abfälle, nahe Carlsbad, New Mexico

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Typen und Entwicklungsstadien von Salzlagerstätten (nach TRUSHEIM 1957, links – Salzkissen, mittig – Salzstöcke, rechts – Salzrücken, Salzmauern). Die in halber Höhe des Blockbildes verlaufende horizontale Linie markiert die primäre Mächtigkeit der vor den salztektonischen Prozessen ursprünglich flach lagernden Evaporite.	8
Abb. 2: Erdgeschichtliches Entwicklungsschema der Salzstruktur Gorleben (ZIRNGAST 1985). Basis Keuper – vor ca. 230 Mio. a; Basis Oberkreide – vor ca. 100 Mio. a; Basis Tertiär – vor ca. 65 Mio. a; Basis Mitteloligozän – vor ca. 30 Mio. a.	9
Abb. 3: Beispiel für die Lagerungsbedingungen der Salzsichten in Salzstöcken (Salzstock Gorleben, BORNEMANN et al. 2008)	10
Abb. 4: Beispiel für das Absaufen eines Kalisalz-Bergwerkes durch Abbautätigkeit unmittelbar unterhalb des Salzspiegels (Standort Staßfurt)	13
Abb. 5: Polierter Anschliff einer Hauptsalzprobe (Kristallbrockensalz) aus dem Salzstock Gorleben mit deutlichen Anzeichen für bruchhafte Deformationen und anschließende Verheilungsprozesse (schwarzer Pfeil – Kristallbruchstück, weißer Pfeil – Matrix, Höhe ca. 5 cm)	14
Abb. 6: Lithologische Inhomogenitäten bzw. Schwankungen im Tongehalt eines heterogen zusammengesetzten Teilabschnittes des Opalinustones der Schweiz, der generell als Beispiel für ein relativ homogenes toniges Wirtsgestein gilt (NAGRA 2002a)	17
Abb. 7: Illustration der Schwankungsbreiten in der mineralogischen Zusammensetzung der jurassischen, in Frankreich für die HAW-Endlagerung vorgesehenen Tongesteine (ANDRA 2005c)	18
Abb. 8: Hydraulische Durchlässigkeit der in Frankreich für die HAW-Endlagerung vorgesehenen Tonformation im Vergleich mit anderen Tonvorkommen (ANDRA 2005c)	19
Abb. 9: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von tonigen Gesteinen von ihrem Wassergehalt (NAGRA 2002a). Deutlich zu sehen sind die extrem großen Schwankungsbreiten der einaxialen Druckfestigkeiten für die Tonvorkommen nahe Bure (4) und Wellenberg (7).	20
Abb. 10: Änderung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften von Tonformationen bei abnehmenden Wassergehalten, d. h. bei stärkerer metamorpher Überprägung (NAGRA 2002a)	21

- Abb. 11: Änderung der Orientierung des Normalspannungsvektors mit zunehmender Tiefe des in Frankreich als Endlagerwirtsgestein vorgesehenen Callovo-Oxfordian-Tons (ANDRA 2005c) 22
- Abb. 12: Variationsbreiten in der mineralogischen Zusammensetzung von weltweit vorkommenden tonigen Gesteinen (NAGRA 2002a) 23
- Abb. 13: Untertagelabor Äspö (Schweden) – teufenbezogene Änderung der Größe des Hauptnormalspannungsvektors (ASK 2003). Die Messungen der Spannungswerte erfolgten mittels Hydrofrac-Verfahren. σ_v – vertikaler Stress (Dreiecke – theoretische Werte, Rhomben – In-situ-Messergebnisse) 27
- Abb. 14: Teufenabhängige Änderung der horizontalen In-situ-Spannungen in den kristallinen Wirtsgesteinen von vier potenziellen Endlagerstandorten in Finnland (Quelle POSIVA) 28
- Abb. 15: Illustration der an Variationen der mineralogischen Zusammensetzung gebundenen deutlichen Veränderungen der Durchschallungsgeschwindigkeiten von granitoiden Gesteinen im Umfeld von 50 m von Störungszonen auf der 9. (a) und der 11. Sohle (b) der Lagerstätte Antej, Sibirien (x-Achse – Entfernung von der Störungszone in m; y-Achse – Durchschallungsgeschwindigkeiten in km/s). Auf der 9. Sohle besteht das unmittelbare Umfeld der in Störungszonen lokalisierten Uranmineralisation aus niedrig temperierten Chlorit-Glimmer-Gesteinen, während die Störungszonen auf der 11. Sohle intensiv verquarzt sind, was deutliche Unterschiede im geomechanischen Verhalten der Gesteine zur Folge hat (LAVEROV et al. 2008). 29
- Abb. 16: Veränderung der Orientierung der Vektoren der maximalen horizontalen Kompression auf der 9. (a, + 182 m üNN) und 12. Sohle (b, +/- 0 m üNN) der Lagerstätte Antej (1 - Störungszonen und ihre Nummer, 2 – Richtung der Blockverschiebung entlang den Störungszonen, 3 – Einfallrichtung, 4 – Orientierung des Vektors der maximalen Kompression, 5 - Orientierung des Vektors der minimalen Kompression, 6 – Richtung der maximalen Deformation/Streckung vertikaler Auffahrungen, LAVEROV et al. 2008) 29
- Abb. 17: Variationen der Klufthäufigkeiten (links) und hydraulischen Durchlässigkeiten (rechts) in einer ca. 1000 m tiefen Erkundungsbohrung am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Oskarshamn (SKB 2006a) 31
- Abb. 18: Teufenbezogene Angaben zur Durchlässigkeit der in einer frühen Phase des finnischen Standortauswahlprozesses betrachteten potenziellen granitoiden Endlagerwirtsgesteine (RO - Romuvaara, VE - Veitsivaara, KI - Kivetty, OL - Olkiluoto, SY – Syyry; McEWEN & ÄIKÄS 2000) 32

Seite

Abb. 19:	Häufigkeitsverteilung der in 12 tiefen Erkundungsbohrungen am schwedischen Standort Laxemar (Oskarshamn) für jeweils 20 m mächtige Bereiche gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten (SKB 2007)	32
Abb. 20:	Zusammenfassung der allgemeinen Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (BGR 2006)	36
Abb. 21:	Geographische Lage der durch die Anwendung der Ausschlusskriterien „seismische Aktivität“ und „vulkanische Gefährdung“ als ungeeignet für die HAW-Endlagerung bewerteten Regionen innerhalb Deutschlands (violett – erhöhte seismische Gefährdung, d. h. seismische Zone > 1 nach DIN 4149; schraffiert – vulkanische Gefährdung; HOTH et al. 2007)	43
Abb. 22:	Insbesondere in Bezug auf die Langzeitsicherheit und technische Machbarkeit der Endlagerbergwerkes ausgerichtete Kriterien zur Standortevaluation für ein HAW-Endlager in der Schweiz (BFE 2008, aus: NAGRA 2008c)	45
Abb. 23:	Temperaturverteilung für den Untergrund Deutschlands in einer Tiefe von -1000 m uNN (HOTH et al. 2007)	49
Abb. 24:	Beispiele für die Anwendung von Standortauswahlkriterien im Rahmen der Bewertung der unterjurassischen norddeutschen Tonvorkommen hinsichtlich ihrer Eignung für ein Endlager für HAW (Hoth et al. 2007).	50
Abb. 25:	Prinzipien der Standortevaluation im Schweizer Standortauswahlverfahren (NAGRA 2008c)	52
Abb. 26:	Schematisierte geologische Karte Finnlands, auf der sehr alte magmatische und metamorphe Gesteinskomplexe dominieren. Schwarz hervorgehoben sind die im Verlaufe des finnischen Standortauswahlverfahrens näher betrachteten Regionen (McEWEN & ÄIKÄS 2000, siehe auch Abb. 28)	63
Abb. 27:	Überblick zum Ablauf des finnischen Standortsuchverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (McEWEN & ÄIKÄS 2000)	64
Abb. 28:	Verteilung der im Ergebnis von Übersichtsstudien schrittweise reduzierten potenziell geeigneten Endlagerstandortregionen (links – 327 regionale Blöcke, rechts – 134 mögliche Endlagergebiete) in Finnland (McEWEN & ÄIKÄS 2000)	65
Abb. 29:	Lage der fünf detailliert untersuchten Standorte für den Bau eines Endlagers für abgebrannte bzw. ausgediente Brennelemente in Finnland (McEWEN & ÄIKÄS 2000)	66
Abb. 30:	Geographische Lage des wahrscheinlichen finnischen Endlagerstandortes für abgebrannte Brennelemente Olkiluoto (Quelle Posiva)	68

Seite

Abb. 31:	Schematische Darstellung des Forschungs- und Erkundungsbergwerkes ONKALO am Standort Olkiluoto, das bei Nachweis seiner Eignung als Endlagerbergwerk ausgebaut werden soll (1 = Zugangsstrecke (Rampe), 2 = Ventilationsschacht, 3+4 = Untersuchungssohlen) (Quelle Posiva)	69
Abb. 32:	Verteilung der Salzlagerstätten in Europa (KBB 2007). Deutlich zu sehen ist das Fehlen von Salzvorkommen in Skandinavien.	70
Abb. 33:	Geographische Karte Schwedens, auf der die prinzipiell für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente geeigneten Kristallingebiete in hellgrün dargestellt sind (FZKA 2008)	71
Abb. 34:	Zeitlicher Ablauf der regionalen Standortuntersuchungen für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente im kristallinen Grundgebirge Schwedens (CLAB – Zentrales Zwischenlager, SFR – Spent fuel repository, FZKA 2008)	72
Abb. 35:	Schematische geologische Karte und Lage mächtiger Störungszonen im Umfeld des URL Äspö auf der Halbinsel Simpevarp, bei Oskarshamn (Quelle SKB)	73
Abb. 36:	Vorausgewählte Regionen für die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in Schweden (FZKA 2008)	74
Abb. 37:	Schrittweise Reduzierung der Untersuchungsfläche für die Auswahl eines Standortes für ein Brennelemente-Endlager am Standort Oskarshamn (SKB 2007)	75
Abb. 38:	Verteilung der Salzlagerstätten unterschiedlichen Alters in Frankreich (KBB 2007)	77
Abb. 39:	Lage der im ersten Standortsuchverfahren ausgewiesenen vier potenziell geeigneten Endlagerregionen in Frankreich	78
Abb. 40:	Verteilung der im zweiten Suchverfahren ausgewiesenen potenziell geeigneten Standortregionen in Frankreich (Erläuterungen siehe Text)	79
Abb. 41:	Geographische Lage des URL Bure und schematisches geologisches 3D-Modell zum Tiefenbau der Region (ANDRA 2005c)	81
Abb. 42:	Vereinfachter geologischer Schnitt durch das Pariser Becken und Lage des URL Bure innerhalb dieser Struktur (ANDRA 2005c)	82
Abb. 43:	Verteilung der Salzlagerstätten in der Schweiz (KBB 2007)	84
Abb. 43:	Verteilung der potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneten Gesteinsformationen in der Schweiz (NAGRA 2005)	85
Abb. 45:	Verbreitung des Opalinuston und der Unteren Süßwassermolasse in der Schweiz (NAGRA 2005)	89
Abb. 46:	Schematischer geologischer Schnitt durch den Mont Terri, mit Angaben	

	Seite
	zur Lage des URL Mont Terri 90
Abb. 47:	Aufbau und Lage der Versuchsorte im Schweizer Mont-Terri-Felslabor 90
Abb. 48:	Auswahl von geologischen Standortgebieten für die Errichtung eines HAW-Endlagers in der Schweiz (Schritte gemäß SGT, Etappe 1, NAGRA 2008a) 93
Abb. 49:	Lage der von RICHTER-BERNBURG & HOFRICHTER (1964) vorgeschlagenen potenziellen Endlagerstandorte in Salzstrukturen (1 – Heide, 2 – Geesthacht, 3 – Harsefeld, 4 – Bunde/Jemgum, 5 – Krummendeich, 6 – Bremen-Lesum; gelbe Kreise – Standorte Kernreaktoren) 97
Abb. 50:	Im Ergebnis der KEWA-I-Studie ausgewiesene potenzielle Endlagerstandorte in Deutschland (Nummerierung siehe Text, gelbe Kreise – Standorte von Kernreaktoren) 104
Abb. 51:	Verteilung der Naturparks, Kurzerholungs- und Feriengebiete im Bereich des Landkreises Lüchow-Dannenberg als Grund für die Nichtberücksichtigung des Standortes Gorleben im KEWA-Auswahlverfahren des Bundes (KEWA 1974) 108
Abb. 52:	Lage der vier, in Phase 3 des Auswahlverfahrens des Landes Niedersachsen festgelegten potenziell möglichen HAW-Endlagerstandorte in der Nähe von Salzstöcken (1 – Börger, Salzstock Wahn; 2 – Ahlden, Salzstock Lichtenhorst; 3 – Salzstock Gorleben; 4 – Grube Mariagluck; Salzstock Höfer; blau – in Norddeutschland vorkommende Salzstrukturen) 111
Abb. 53:	Verteilung von potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneten Vorkommen alternativer Wirtsgesteinstypen in Deutschland (Salinarstrukturen: I – Wahn, II – Zwischenahn, III – Gülze-Sumte, IV – Waddekath; Kristallinregionen: 1 – Saldenburg, 2 – nördlicher Oberpfälzer Wald, 3 – Fichtelgebirge, 4 – Graugneis Erzgebirge, 5 – Granulitgebirge, 6 – Pretzsch, 7 – Prettin, 8 – Pulsnitz, 9 – Radeberg-Löbau, 10 – Ostlausitz-Zawidow; BGR 2006) 115
Abb. 54:	Stratigraphische Position der bezüglich ihrer Eignung für die HAW-Endlagerung als untersuchungswürdig eingestuften Tonformationen Deutschlands (HOTH et al. 2007) 117
Abb. 55:	Karte der Verteilung der untersuchungswürdigen Tonformationen in Deutschland (HOTH et al. 2007) 118
Abb. 56:	Vorkommen von Salzlagerstätten in den USA (KBB 2007) 119

	Seite
Abb. 57: Geographische Lage des in einer flach lagernden permischen Salzformation befindlichen Endlagerstandortes WIPP in den USA	120
Abb. 58: Stratigraphische Abfolge am Standort der WIPP (Powers 2007). Die Position des Endlagers innerhalb der hier ca. 600 m mächtigen permischen Salado-Formation (Zechstein-Salz) ist mit „WIPP-Horizon“ bezeichnet.	121
Abb. 59: Lithologischer Aufbau der Schichtenfolge am Standort der Waste Isolation Pilot Plant, USA (SCHUBARTH-ENGELSCHALL 2003)	122
Abb. 60: Ablauf und Ergebnisse der in den 1980er Jahren schrittweise durchgeführten Reduzierung der Anzahl möglicher HAW-Endlagerstandorte in den USA (von links nach rechts: 1 – 1984, 2 – 1986, 3 und 4 – 1987; Quelle DOE)	125
Abb. 61: Schematischer geologischer Schnitt durch den Yucca Mountain mit den wichtigsten hydrogeologischen Einheiten (SCHUBARTH-ENGELSCHALL 2003)	125
Abb. 62: Geographische Lage und Oberflächenansicht des in der Chihuahua-Wüste gelegenen Endlagerstandortes Yucca Mountain in den USA (Quelle DOE)	126