

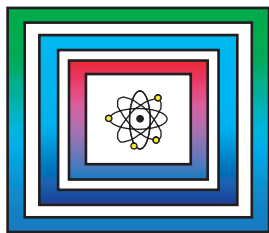
F+E Endlagerung

9Y3215080000

EUGENIA

Teil 2:

Methoden der Suche und
Erkundung von Standorten
für HAW-Endlager
in unterschiedlichen
Wirtsgesteinstypen



Abschlussbericht

Hannover, Juli 2009

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

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

Teil 2

Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für
HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen

Autoren:	Hammer, Jörg, Dr. Sönke, Jürgen
Auftraggeber:	BMWi
Auftragsnummer:	9Y3215080000
Datum:	17.07.2009
Tagebuchnummer:	10684/09
TK-Nummer:	2363

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
1 Vorwort	5
2 Standortvorauswahl	6
2.1 Phasen der Standortauswahl	7
2.2 Vorgehen und wirtgesteinsunabhängige Methoden der Standortvorauswahl	13
2.3 Wirtgesteinsspezifische Methoden der Standortvorauswahl	18
2.3.1 Standortvorauswahl im Steinsalz	19
2.3.2 Standortvorauswahl im Tonstein	20
2.3.3 Standortvorauswahl im Kristallin	24
3 Standorterkundung	26
3.1 Übertägige Standorterkundung	29
3.1.1 Methoden der übertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Steinsalz, Tonstein und Kristallin	30
3.1.2 Übertägige Erkundung von Salzformationen	36
3.1.3 Übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben	45
3.1.4 Übertägige Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Tonen/ Tonsteinen	49
3.1.5 Beispiele für übertägige Standorterkundungen in tonigen Gesteinsformationen	58
3.1.6 Übertägige Erkundung von HAW-Endlagerstandorten im Kristallin	70
3.2 Untertägige Standorterkundung	89
3.2.1 Wirtgesteinsunabhängige Untersuchungen	91
3.2.1.1 Geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen	93
3.2.1.2 Hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsverfahren	98
3.2.1.3 Geomechanische und thermophysikalische Untersuchungsmethoden	107
3.2.1.4 Untersuchungen endlagerrelevanter gekoppelter Prozesse - Schlüsselexperimente	115
3.2.2 Besonderheiten der untertägigen Standorterkundung in unterschiedlichen Wirtgesteinen	117
3.2.2.1 Untertägige Standorterkundung im Steinsalz	118
3.2.2.2 Untertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben	123
3.2.2.3 Untertägige Standorterkundung in Tonsteinen	129
3.2.2.4 Beispiele für untertägige Standorterkundungen in Tonsteinen	144

Inhaltsverzeichnis	Seite	
3.2.2.5	Untertägige Standorterkundung im Kristallin	154
3.2.2.6	Beispiele für die untertägige Standorterkundung in kristallinen Gesteinen	166
4	Zusammenfassung	172
	Literaturverzeichnis	182
	Abkürzungsverzeichnis	194
	Tabellenverzeichnis	197
	Abbildungsverzeichnis	198

Gesamtblattzahl: 205

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Hammer, Jörg, Dr. Sönke, Jürgen
Titel:	Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen, Eugenia Teil 2
Stichwörter:	Endlagerung, Standorterkundung, Standortsuche, Untertagelabor, Untersuchungsverfahren, Wirtsgesteine

Im vorliegenden Bericht werden anhand von ausführlich dargestellten Beispielen aus Standortauswahlverfahren in Schweden, Finnland, Russland, Frankreich, Schweiz und Deutschland die bei der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen eingesetzten Methoden beschrieben.

Ausgehend von den im Teil 1 des EUGENIA-Abschlussberichtes (HAMMER et al. 2009) detailliert betrachteten wirtsgesteinsspezifischen Standortanforderungen bzw. -auswahlkriterien werden die Unterschiede in den Erkundungszielen und in den Methoden, die bei den Such- und Erkundungsarbeiten für HAW-Endlagerstandorte in den Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin eingesetzt werden, erläutert. Die Darstellung der Methoden der Standorterkundung erfolgt getrennt für die über- und untertägigen Erkundungsarbeiten. Im Rahmen übertägiger Standorterkundungen werden schwerpunktmäßig geophysikalische Messungen an der Erdoberfläche, Tiefbohrungen sowie geophysikalische und hydrogeologische Untersuchungen in den Erkundungsbohrungen durchgeführt, um die Erfüllung der Standortkriterien nachzuweisen. Die detaillierte Darstellung der Methoden der geologisch-geotechnischen untertägigen Erkundung umfasst umfangreiche, getrennt für die unterschiedlichen Wirtsgesteine beschriebene Beispiele der in Untertagelabors oder Erkundungsbergwerken durchgeführten Untersuchungen der Wirtsgesteinseigenschaften, In-situ-Tests von Einlagerungskonzepten bzw. Einlagerungstechnik sowie Analysen der Wechselwirkungen zwischen den eingelagerten Abfällen und dem Multibarrierensystem.

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 Fragestellungen bei der Suche und Erkundung von Endlagerstandorten in Deutschland. Außerdem untersucht die BGR als nachgeordnete Bundesoberbehörde im Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) in grundlagenorientierten Forschungsprojekten geowissenschaftliche und geotechnische Fragestellungen. Insbesondere werden Untersuchungen zur Verbreitung von Wirtsgesteinen, zur geologisch-geophysikalischen Standorterkundung, zur gesteinsphysikalischen Charakterisierung des Wirtsgesteins, zur Beurteilung der Wirksamkeit geologischer und geotechnischer Barrieren sowie zur Analyse von zukünftigen Szenarien für die Langzeitsicherheit von Endlagern durchgeführt.

Im Rahmen 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 Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin. Der vorliegende Bericht stellt den zweiten Teil der Ausarbeitungen dar. In einem ersten Forschungsbericht (HAMMER et al. 2009) wurden ausführliche Informationen und Anwendungsbeispiele zu den endlagerrelevanten Wirtsgesteinseigenschaften, den Standortanforderungen und Auswahlkriterien für HAW-Endlagerstandorte sowie Beispiele für Standortauswahlverfahren in den Ländern Frankreich, Schweiz, Finnland, Schweden, Deutschland und USA bzw. in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin zusammengetragen. Die im Forschungsprojekt EUGENIA gesammelten Erkenntnisse und Daten bilden eine sehr gute Grundlage für den Vergleich von unterschiedlichen Wirtsgesteinsoptionen und für die Planung von Standortsuch- und -erkundungsarbeiten.

2 Standortvorauswahl

Entsprechend den Empfehlungen der IAEA (1990) ist die Langzeit- bzw. Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle (HAW) aus der zivilen und militärischen Nutzung der Kernenergie in tiefen geologischen Formationen die sicherste Methode zum Schutz der Biosphäre vor ihren negativen Auswirkungen. Trotz der in einigen Ländern seit fast fünf Jahrzehnten andauernden diesbezüglichen Untersuchungen existieren derzeit weltweit noch keine genehmigten und betriebsbereiten Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle. Dass derartige Abfallstoffe in geologischen Strukturen, die sich einige Hundert Meter unterhalb der Erdoberfläche befinden, über sehr lange Zeiträume und frei von negativen Beeinflussungen der Biosphäre isoliert werden, belegen die zahlreichen, für die Menschheit ungefährlichen Vorkommen von Uranlagerstätten im oberen Teil der Erdkruste. Außerdem bestätigen die Ergebnisse umfassender Studien natürlicher Analoga von HAW-Endlagern und die Resultate von In-situ-Versuchen in Untertagelaboren oder Erkundungsbergwerken die Möglichkeit einer umweltschonenden Beseitigung von hochradioaktiven Abfällen in dafür geeigneten, tief liegenden Gesteinsformationen. Gestützt wird dies auch durch die Daten aus Laborexperimenten und thermodynamischen Modellierungen sowie durch die Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen, die weltweit für mögliche Endlagerstandorte in unterschiedlichen Gesteinsformationen durchgeführt werden.

In der Mehrzahl der aktuell mit Endlagerprojekten befassten Länder geht es nicht um die Suche nach dem landesweit „besten“ Standort, sondern um die Auswahl eines geeigneten Endlagerstandortes, der eine Gefährdung von Mensch und Umwelt sicher ausschließen lässt. Dabei erfolgt die Standortsuche nach Regeln, die im Vorfeld des Auswahlprozesses festgelegt wurden, und unter streng vorgegebenen Rahmenbedingungen, die neben geowissenschaftlichen auch raumordnerische und sozioökonomische Auswahlkriterien berücksichtigen.

Bestätigt durch die gerichtliche Auseinandersetzung um das Endlager Konrad für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, fordert das deutsche Atomgesetz in Analogie zur Gesetzgebung in anderen Ländern nicht die Auswahl des am besten geeigneten, sondern eines geeigneten Standortes, der höchste Sicherheitsanforderungen erfüllen muss. In allen weltweit durchgeführten Standortauswahlverfahren wird ähnlich vorgegangen (siehe HAMMER et al. 2009). Russland wird z. B. trotz komplexer und vielfältiger geologischer Verhältnisse auf seinem riesigen Territorium und vielen prinzipiell für die HAW-Endlagerung geeigneten Salz- und Tonsteinvorkommen, für die geplanten Endlager keine Auswahlverfahren durchführen, die landesweit nach den besten Standorten suchen. Russland wird seine Abfälle nach Vorlage erfolgreicher Langzeitsicherheitsnachweise in kristallinen Gesteinen in unmittelbarer Nähe zu den Abfallproduzenten langfristig lagern (HAMMER 2003, 2005). Infolge der großen Mengen hochradioaktiver Abfälle ist die Errichtung mehrerer HAW-Endlager vorgesehen, z. B.

in den präkambrischen Gneis- bzw. Granitoidformationen des Südteils des Sibirischen Schildes (nahe Krasnojarsk) und der Kola-Halbinsel sowie in den basischen vulkanischen Gesteinen des Südurals (nahe Majak, bei Jekaterinburg).

Die für Deutschland vom AkEND (2002) geforderte Festlegung des „bestmöglichen“ Standortes nach detaillierter, untertägiger Erkundung mehrerer Standorte (möglichst in unterschiedlichen Wirtsgesteinen) ist vor dem Hintergrund prinzipiell fehlender Möglichkeiten eines Vergleichs der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten in verschiedenen Gesteinstypen sowie unter Berücksichtigung der riesigen Kosten untertägiger Erkundungsarbeiten in der Praxis nicht realisierbar. Eine solche Vorgehensweise würde einen Vergleich der Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit unterschiedlicher Endlagersysteme bzw. -konzepte in verschiedenen Gesteinen mit deutlich variierenden Barriereigenschaften erfordern. Aufgrund der Komplexität der dabei zu berücksichtigenden geologischen, geotechnischen und technischen Einflussfaktoren kann ein belastbares, objektives und nachvollziehbares Ranking unterschiedlicher Endlagerkonzepte entsprechend ihrer Langzeitsicherheit nicht erfolgen. Es ist im Ergebnis eines Langzeitsicherheitsnachweises lediglich möglich, die Eignung des Endlagerkonzeptes am konkret betrachteten Standort nachzuweisen. Die Auswahl des „besten“ Standortes bzw. Endlagerkonzeptes auf der Grundlage von evtl. zu berechnenden „Eignungsgraden“ ist praktisch nicht durchführbar. Außerdem zeigen die Standortauswahlverfahren z. B. in Skandinavien, Frankreich oder in den USA, dass letztendlich für die Standortentscheidung nicht nur sicherheitsrelevante, sondern auch (und vor allem) sozioökonomische Kriterien, wie z. B. Zustimmung der Standortgemeinde oder Nähe zu Abfallproduzenten, ausschlaggebend sind (ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009).

2.1 Phasen der Standortauswahl

Wie am Beispiel mehrerer, weit fortgeschrittener Standortauswahlverfahren gezeigt werden kann, unterscheiden sich die Vorgehensweisen bei der Standortauswahl in den einzelnen Ländern (HAMMER et al. 2009). Es existiert kein international vereinbarter Standard für die Durchführung eines Endlager-Standortauswahlverfahrens. In den diesbezüglichen Unterlagen der IAEA (IAEA 1993, 1994, 2003) wurden lediglich allgemeine Vorgaben zum Standortauswahlverfahren für ein Endlager für radioaktive Abfälle zusammengestellt, konkrete Handlungsempfehlungen fehlen. Aufgrund spezifischer geologischer Gegebenheiten (z. B. Vorkommen unterschiedlicher potenziell geeigneter Gesteinstypen, Fehlen von Wirtsgesteinsalternativen, Ausschluss von Landesteilen infolge seismischer oder vulkanischer Gefährdungen), unterschiedlich gewichteter Standortauswahlkriterien sowie verschiedenartiger rechtlicher, verwaltungstechnischer und politischer Vorgaben für den Auswahlprozess, variieren Anzahl, Inhalt und Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte. Deutliche länderspezifische Unterschiede gibt es auch hinsichtlich der Prozedur beim

Vergleich und bei der Reihung mehrerer vorausgewählter bzw. prinzipiell geeigneter Standorte.

Allen weltweit durchgeführten Standortauswahlverfahren ist gemeinsam, dass ein mehrstufiges Vorgehen („stepwise approach“) mit schrittweiser Selektion der in Frage kommenden Regionen erfolgt. Die einzelnen Phasen des Standortauswahlprozesses bauen aufeinander auf und werden in immer größerem Maßstab durchgeführt, beginnend mit der Abgrenzung großer geologisch-tektonischer Blöcke bis hin zur Festlegung des endgültigen Endlagerstandortes. Abb. 1 illustriert am Beispiel des finnischen Standortauswahlverfahrens die sukzessive Einengung des Untersuchungsgebietes und die schrittweise Reduzierung der Anzahl der Standortalternativen (McEWEN & ÄIKÄS 2000). Wie aus dieser Abbildung ersichtlich, sind für Endlagerprojekte in kristallinen Gesteinen die Vorkommen von mächtigen Störungszonen der wichtigste limitierende geologische Faktor bei der Abgrenzung der potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneten Regionen.

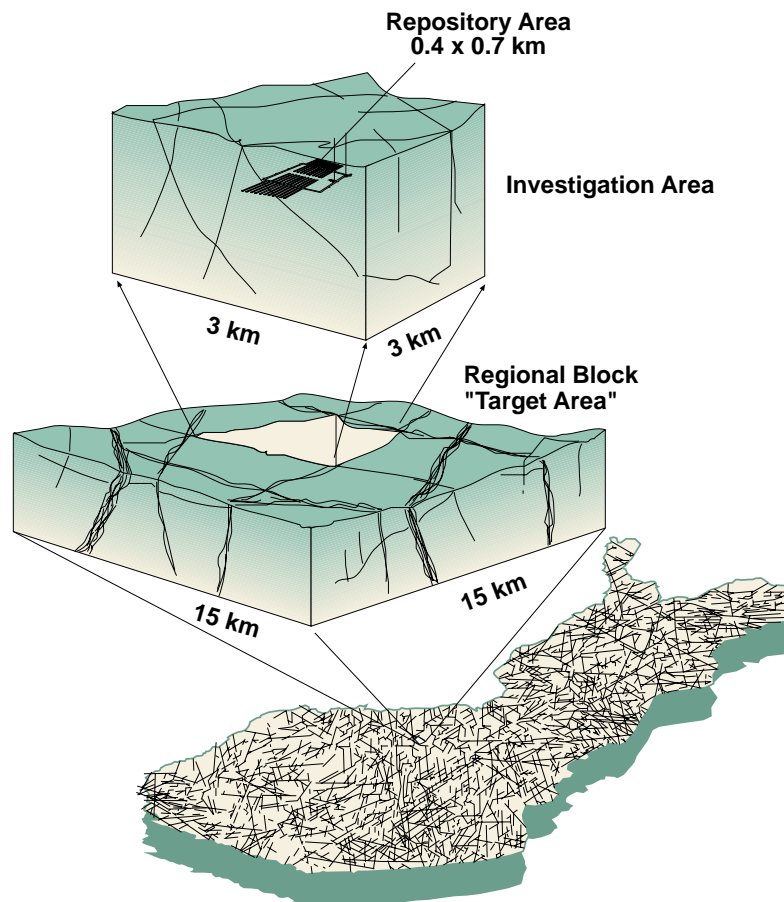


Abb. 1: Illustration der schrittweisen Vorgehensweise und des zunehmenden Detailliertheitsgrades bei der Standortauswahl für ein HAW-Endlager in kristallinen Gesteinen am Beispiel Finnlands (McEWEN & ÄIKÄS 2000)

Mit fortschreitender Dauer des Auswahlprozesses kommt es zu einer Vergrößerung des Bearbeitungsmaßstabes bzw. der Datendichte. Dabei nimmt nicht nur der Detaillierungsgrad der dem Auswahlprozess zugrunde gelegten Untersuchungsergebnisse zu, sondern es steigen auch die Anforderungen an die Datenqualität. Jede Phase des Auswahlverfahrens ist durch seinen Maßstab der Erkundungsarbeiten und durch bestimmte, vom Maßstab und von der Aufgabenstellung abhängige Methoden der geologisch-geophysikalischen Untersuchungen charakterisiert. Der zunehmende Detailliertheitsgrad der geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten ermöglicht exaktere Vorstellungen zum geologischen Tiefenbau und gestattet präzisere Bewertungen der Eignung der untersuchten Regionen zur HAW-Endlagerung (Abb. 2).

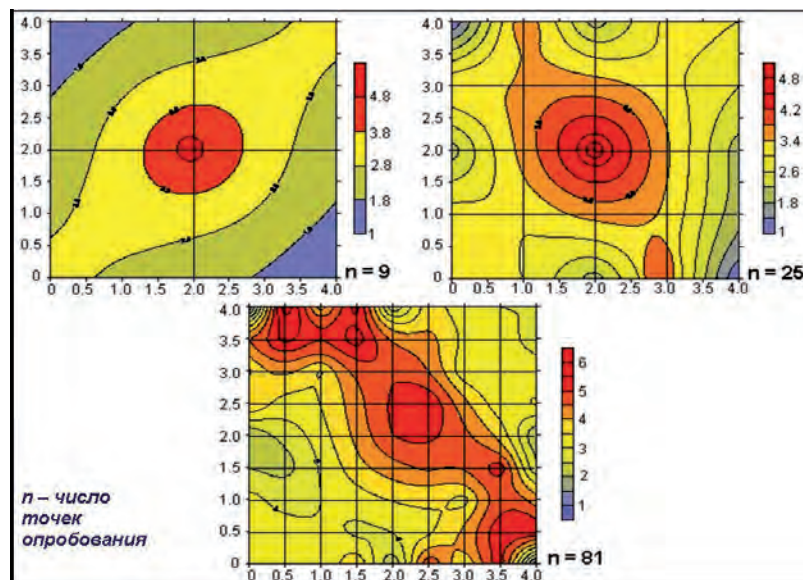


Abb. 2: Veränderung der Vorstellungen zum geologischen Aufbau einer Region bei zunehmendem Detaillierungsgrad der Erkundungsarbeiten bzw. bei steigender Anzahl von Beprobungs- bzw. Messpunkten (LAVEROV et al. 2008)

Das Vorgehen bei der Standortauswahl ist durch eine, auf zunehmend umfangreichere Datengrundlage basierende, permanente Evaluation und Aussortierung von Standortalternativen gekennzeichnet. Die Mehrheit der weltweit realisierten Standortauswahlverfahren lässt sich in vier bis fünf Phasen untergliedern. Trotz aller länderspezifischen Unterschiede kann der Standortauswahlprozess in folgende Phasen bzw. Etappen untergliedert werden:

- a) Screening („overview studies“, „feasibility studies“, „area survey stage“, regionale Vergleichsstudien),
- b) Standortvorauswahl – Ausweisung von untersuchungswürdigen Standortregionen,

- c) übertägige detaillierte Standorterkundung,
- d) untertägige Standorterkundung sowie
- e) Standortentscheidung.

In den meisten Ländern sind bei Erkundungsbefunden, die die Langzeitsicherheit des Endlagers entscheidend in Frage stellen, Rücksprünge in vorherige Auswahlstadien vorgesehen.

Das Screening bzw. die auf kleinmaßstabigen übertägigen geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnissen basierende Ausweisung von potenziell geeigneten, untersuchungswürdigen Standortregionen werden als Standortsuche und die darauf aufbauenden, detaillierten standortbezogenen Arbeiten als Standorterkundung bezeichnet. Die eigentliche Standortsuche stützt sich meist auf noch sehr allgemeine geologische und raumordnerische Informationen. Auf der Grundlage geologischer Karten im Maßstab 1 : 2.000.000 bis 1 : 200.000 und von Archivmaterialien wird dabei allerdings auch noch kein Standort ausgewählt, sondern eine Region bzw. ein geologisch-tektonischer Block, der allgemeine Standortauswahlkriterien und Mindestanforderungen erfüllt. Für die weitere Reduzierung der Anzahl und die flächenmäßige Einengung der potenziell geeigneten Gebiete werden zusätzliche Daten z. B. zur Lagerungstiefe und Mächtigkeit der Wirtsgesteine sowie Angaben zu den hydrogeologischen Bedingungen herangezogen, die im Ergebnis standortbezogener geologischer Erkundungsarbeiten gewonnen werden (siehe Kap. 2.3 und 3.1).

Allen Standortauswahlverfahren ist gemeinsam, dass im Ergebnis dieser Übersichtsstudien wenige, räumlich möglichst eng begrenzte Regionen ausgewählt werden (Standortvorauswahl), auf denen anschließend übertägige geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten erfolgen. Die Anzahl der detailliert zu untersuchenden Regionen und die Kriterien zu ihrer Auswahl sind von Land zu Land unterschiedlich. Nur in wenigen Ländern, die über die entsprechenden geologischen Voraussetzungen verfügen, wurden in frühen Phasen der Standortsuche annähernd zeitgleich Regionen mit unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen detaillierter untersucht (z. B. Frankreich, Schweiz). Die meisten Länder haben sich, ausgehend von den jeweiligen geologischen Voraussetzungen oder von im Vorfeld festgelegten Rahmenbedingungen, von Anfang an auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp festgelegt (z. B. Schweden/Finnland auf Kristallin, Deutschland, Niederlande und Polen auf Steinsalz, Belgien auf Ton). Derartigen Entscheidungen sind umfangreiche Vergleiche der national in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen oder politisch bzw. raumordnerisch motivierte Vorfestlegungen vorausgegangen (ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009).

Aufgrund der jeweiligen geologischen Situation und der daraus resultierenden Einschränkungen bei der Auswahl und räumlichen Verbreitung prinzipiell möglicher Wirtsgesteinstypen ergeben sich in vielen Ländern nur geringe Wahlmöglichkeiten bzw. Freiheitsgrade bei der Standortsuche. Ein typisches Beispiel dafür ist die Schweiz, wo nach intensiven Recherchen lediglich drei räumlich sehr eng begrenzte Gebiete vorselektiert wurden, von denen letztlich nur zwei eine sehr gute Eignungsbewertung erhielten (NAGRA 2008a-c).

Zahlreiche Länder (z. B. Russland, Schweden, Finnland und Kanada) haben per politischem Beschluss festgelegt, dass die radioaktiven Abfälle zur Vermeidung unnötiger Transporte und zur besseren Kontrolle des Umgangs mit ihnen in unmittelbarer Nähe zu den Abfallproduzenten (z. B. Produzenten von Kernbrennstoffen, Wiederaufarbeitungsanlagen, Kernkraftwerke, Kernforschungszentren, militärische Altlasten) end- bzw. langzeitulagern sind. Damit soll der Entsorgungszyklus von der Abfallentstehung bis zur Endlagerung territorial und organisatorisch konzentriert werden. Dies bedeutet praktisch aus Sicherheitsgründen einen Verzicht auf ein landesweites Standortauswahlverfahren. Es wird lediglich im Umfeld dieser Einrichtungen nach Standorten gesucht, die eine langfristig sichere Entsorgung der Abfälle gewährleisten. LAVEROV et al. wiesen in diesem Zusammenhang bereits 1994 darauf hin, dass sich die Suche nach HAW-Endlagerstandorten in Russland trotz der durch die Größe des Landes bedingten vielfältigen Standort- und Wirtsgesteinsalternativen auf die Auswahl optimaler geologischer Rahmenbedingungen innerhalb der „Sanitären Schutzzonen“ bereits bestehender Betriebe der Atomindustrie beschränken wird.

Die im Verlaufe des Standortauswahlprozesses erforderliche sukzessive Reduzierung der Anzahl der Standortalternativen kann aufgrund der Vielfalt der Auswahlkriterien und Problemen bei ihrer Wichtung äußerst kompliziert und schwer kommunizierbar sein. Wenn die Eignungs- und Sicherheitsanforderungen von mehreren Regionen (bzw. später von mehreren Standorten) erfüllt werden, ist ein kriteriengestützter Vergleich der geologischen Erkundungsergebnisse, der Resultate der Langzeitsicherheitsmodellierungen und der nicht geowissenschaftlichen Standortauswahlkriterien erforderlich. Für die Gegenüberstellung der Standorte sind qualitativ und quantitativ (hinsichtlich der Bearbeitungstiefe) vergleichbare Erkundungsergebnisse notwendig sowie die Anwendung einheitlicher, auf Langzeitsicherheitsanalysen beruhender Auswahlkriterien. Ein derartiger kriteriengestützter Vergleich ist annähernd objektiv nur für Standorte im gleichen Wirtsgestein möglich.

Eine Auswertung der weltweit durchgeführten Standortauswahlverfahren (siehe HAMMER et al. 2009) zeigt, dass in diesem Abwägungsprozess häufig aufgrund von sozioökonomischen Gesichtspunkten (wie z. B. die Forderung, dass die Endlager in der Nähe von KKW liegen sollen) bereits im Vorfeld der Anwendung geowissenschaftlicher Auswahlkriterien Bedingungen formuliert werden, die die Anzahl möglicher Standortregionen deutlich

reduzieren. In den meisten Ländern fand nur ein sehr formaler Standortvergleich statt, häufig wurde er durch dirigistische Eingriffe des Staates abgebrochen. So z. B. wurde in den USA die Auswahl von Yucca Mountain per Kongressbeschluss vorgenommen, ohne dass ein detaillierter kriteriengestützter Vergleich mehrerer Standorte vorangegangen war. Auch die Festlegung des WIPP-Standortes erfolgte aufgrund des militärischen Charakters der Anlage ohne einen im Vorfeld der Entscheidung öffentlich diskutierten Alternativenvergleich. Ähnlich wurde auch in anderen Ländern vorgegangen (z. B. Finnland, siehe HAMMER et al. 2009). In Frankreich wurde im Rahmen eines politisch initiierten Suchverfahrens, in dem sich Departments um die Errichtung eines HAW-Endlagers bewerben konnten, der „geeignetste“ Standort ausgewählt. Eine landesweite Suche nach dem „besten“ Standort erfolgte nicht.

Mit Ausnahme der im schweizerischen „Sachplan geologische Tiefenlager“ (BFE 2008, NAGRA 2008a) vorgegebenen Vorgehensweise, basiert in allen weltweit bisher durchgeführten Standortauswahlverfahren die Entscheidung für den Bau von URL's oder Erkundungsbergwerken (als Vorstufe für den Endlagerbau) auf den Ergebnissen übertägiger Erkundungsarbeiten. In keinem Land ist eine zeitlich parallele untertägige Erkundung mehrerer potenziell geeigneter Standorte mit dem Ziel vorgesehen, den „besten“ Standort zu bestimmen. Ausgehend von den extrem hohen Kosten einer untertägigen Standorterkundung findet weltweit keine parallele, sondern bei Nichteignung des ersten eine sukzessive untertägige Erkundung der Standorte entsprechend ihrer ursprünglichen Reihung statt. Um die geologische Barriere am vorgesehenen Endlagerstandort nicht zu schädigen, werden in einigen Ländern zusätzlich in nicht-Standort-bezogenen Untertagelaboren untertägige Erkundungs- bzw. Forschungsarbeiten durchgeführt (z. B. Felslabor Mont Terri in der Schweiz). Damit sollen die für die Optimierung der Endlagerkonzepte erforderlichen Angaben zu den Eigenschaften der Gesteine und zu ihrer Eignung für die Endlagerung zur Verfügung gestellt sowie Methoden und Konzepte unter In-situ-Bedingungen getestet werden.

In Deutschland empfahl der AkEND (2002), dass im Rahmen eines neu zu startenden Auswahlverfahrens zunächst mehrere, potenziell geeignete Standortregionen ausgewiesen werden müssen. Danach soll die übertägige Erkundung von mindestens drei Standorten und letztlich die untertägige Erkundung von wenigstens zwei Standorten möglichst in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erfolgen. Bis zum heutigen Zeitpunkt wurde weltweit in keinem Land ein Vergleich mehrerer Standorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen auf der Basis detaillierter über- und untertägig durchgeführter Standorterkundungen realisiert.

In den meisten nationalen Auswahlverfahren ist vorgesehen, an dem im Ergebnis des Auswahlprozesses festgelegten wahrscheinlichen Endlagerstandort zwecks seiner detaillierten untertägigen Erkundung und zur Durchführung einer standortbezogenen Langzeitsicherheitsanalyse zuerst ein Untertagelabor bzw. ein Erkundungsbergwerk zu

errichten. Erst bei positivem Befund der standortbezogenen Langzeitsicherheitsanalyse und nach Vorlage der Baugenehmigung wird das Endlager errichtet. Sollte sich der Standort im Ergebnis der Langzeitsicherheitsanalyse als nicht geeignet erweisen, wird über einen Rücksprung im Verfahrensablauf ein anderer, auf der Grundlage übertägiger Untersuchungsbefunde schlechter bewerteter Standort für die Durchführung untertägiger Erkundungsarbeiten ausgewählt.

2.2 Vorgehen und wirtsgesteinsunabhängige Methoden der Standortvorauswahl

In Abhängigkeit von den im Vorfeld des Auswahlprozesses vorgegebenen Rahmenbedingungen (siehe HAMMER et al. 2009) werden zu Beginn der Suche nach einem Standort für ein HAW-Endlager die bereits vorliegenden Daten zum geologischen Aufbau entweder für das gesamte Landesgebiet oder für spezielle, oft nicht auf geowissenschaftlicher Grundlage ausgewählte Bereiche des Landes analysiert. Schwerpunkte sind dabei insbesondere Angaben zur Verbreitung potenziell möglicher Wirtsgesteine und mächtiger Störungszonen, von Gebieten mit vulkanischen und seismischen Gefährdungen sowie von (ehemaligen) Bergwerken und Lagerstätten. Im Rahmen eines großräumigen Screenings erfolgt auf der Grundlage von vorher festgelegten Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien die Identifizierung von untersuchungswürdigen, eignungshöffigen Gesteinsformationen bzw. Standortregionen (Ausweisung von „highlight areas“, „target areas“ oder Standortvorauswahl). Der Ablauf und der Aufwand sowie die ggf. zusätzlich einzusetzenden Untersuchungsmethoden werden entscheidend von der Verfügbarkeit und dem Detailliertheitsgrad der bereits vorliegenden, für den Auswahlprozess erforderlichen Informationen bestimmt.

In den frühen Phasen der Standortsuche werden vor allem folgende geowissenschaftliche Ausschlusskriterien bzw. Mindestanforderungen zur Abgrenzung potenziell geeigneter Standortregionen angewendet (siehe auch HAMMER et al. 2009):

- geringe seismische und vulkanische Aktivitäten,
- keine großräumigen Hebungen (kleiner 1 mm/a),
- keine aktiven Störungszonen und geringe tektonische Zerböckung,
- Mächtigkeit des Wirtsgesteins größer 100 m,
- Tiefenlage der geplanten Einlagerungssohle zwischen 300 und 1000 m u GOK,
- ausreichende Fläche (abhängig vom Wirtsgestein und seinen Eigenschaften, wie z. B. Wärmeleitfähigkeit),

- weitgehende Unverritztheit der Struktur,
- geeignete Gebirgstemperaturen im geplanten Endlagerniveau,
- lange Fließzeiten und hohe Alter der Grundwässer im für die Endlagerung vorgesehenen Einlagerungsbereich,
- niedrige hydraulische Gradienten,
- günstige hydrochemische Verhältnisse (gering mineralisierte und reduzierende Grundwässer),
- Homogenität der Gesteine und geringe Anisotropie in ihren endlagerrelevanten Eigenschaften,
- hohe Standfestigkeit,
- gute Wärmeleitfähigkeit und geringe thermische Ausdehnung des Gesteins,
- niedrige, möglichst isotrop verteilte Gebirgsspannungen sowie
- keine Nutzungskonflikte mit Rohstoffen und anderen natürlichen Ressourcen.

In den meisten Ländern, die Endlagerprojekte verfolgen, liegen die für die Anwendung der genannten Auswahlkriterien erforderlichen Informationen beim Start des Auswahlverfahrens zumindest teilweise vor. Die Daten zu Hebungen, Seismizität und Vulkanismus sind meist landesweit vorhanden, während Angaben zur Identifizierung von aktiven Störungszonen oder zur Charakterisierung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen meist nur lokal begrenzt existieren. In dieser Phase des Standortsuchprozesses fällt in den meisten Ländern, ausgehend von einer Bewertung des Erfüllungsstandes der genannten Auswahlkriterien, hinsichtlich des Endlagerwirtsgesteins eine Vorentscheidung.

Im Regelfall beschränken sich im Stadium der Standortsuche bzw. -vorauswahl, d. h. beim Vergleich von Standortregionen, die Arbeiten auf die Sammlung und Analyse der bereits aus anderen Untersuchungsprogrammen (z. B. Rohstoffsuche und geologische Kartierung) vorhandenen geologischen Daten. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Datenherkunft und der Datenqualität/-quantität ist es häufig notwendig, die bereits vorhandenen Datensätze hinsichtlich der zu klärenden Fragestellungen aufzuarbeiten und zu homogenisieren, um vergleichbare Informationen für die anstehenden Eignungsbewertungen zu haben. Für die Beschaffung der in dieser Phase des Auswahlprozesses notwendigen Daten, z. B. zur Verbreitung, Mächtigkeit und Tiefenlage der betrachteten Wirtsgesteinsformationen oder zu den tektonischen und hydrogeologischen Bedingungen in den Regionen, werden sämtliche in Archiven, speziellen Datenbanken (z. B. Bohrungsdatenbanken der Geologischen Dienste oder in Datenbanken zusammengestellte Ergebnisse seismischer Profilmessungen), Publikationen, internen (nicht publizierten) Firmenberichten oder Web-

Portalen vorhandenen Informationen gesichtet. Wenn erforderlich, werden diese Daten gezielt neu ausgewertet oder reprozessiert. Liegen die notwendigen Kenntnisse für die Anwendung der Kriterien noch nicht vor, so müssen sie z. B. durch die Auswertung geologischer oder topographischer Karten bzw. Berichte neu generiert oder ggf. durch ergänzende geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten gewonnen werden.

Für die in den 1970er Jahren in Deutschland durchgeführten Standortauswahlverfahren für Salzstöcke (siehe HAMMER et al. 2009) standen im Ergebnis umfangreicher Rohstoffexplorationsprogramme und geologischer Kartierungsarbeiten detaillierte Kenntnisse zur Verfügung. Diese ermöglichten die Anwendung der Mehrzahl der in den Verfahren genutzten geowissenschaftlichen und raumordnerischen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (u. a. Tiefenlage und Größe des Salzstocks, Deckgebirgsmächtigkeit, konkurrierende Nutzungen, Unverritztheit) ohne ergänzende übertägige Erkundungsarbeiten. Es flossen vor allem umfangreiche Informationen aus Bohrungen und geophysikalischen (vor allem seismischen) Messungen der Erdöl-/Erdgasindustrie und aus dem Kali- und Steinsalzbergbau sowie erste Ergebnisse von Komplexinterpretationen dieser Basisdaten (z. B. JARITZ 1972, KOCKEL & ROLAND 1977) in die Auswahlentscheidungen ein. Zusätzlich wurden für spezielle Fragestellungen ergänzende Gutachten in Auftrag gegeben (z. B. LÜTTIG & WAGER 1974, KBB 1974). Die Durchführung spezieller geologischer Erkundungsarbeiten zur Erlangung zusätzlicher Daten für die Eignungsbewertung der vorläufig am besten eingeschätzten Standorte war aufgrund von Bürgerprotesten nur sehr eingeschränkt möglich.

Auch für die ab 2003 von der BGR durchgeführte Abgrenzung untersuchungswürdiger Tongesteinsformationen standen im geologisch intensiv erforschten Deutschland ausreichende Informationen aus der Erdöl-/Erdgas-, Salz- und Erzerkundung sowie aus Forschungs-, Kartierungs- und Geothermiebohrungen zur Verfügung (insgesamt ca. 25 000 Bohrungen, siehe Abb. 3). Die in Archivunterlagen, Bohrberichten (inklusive Bohrlochgeophysik), Karten, Datenbanken und seismischen Erkundungsberichten enthaltenen umfangreichen Daten zur tiefen- und flächenmäßigen Verbreitung und zur lithologisch-mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der tonigen Gesteine stellten eine ausreichende Grundlage für die Ausgliederung von potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneten Tonformationen dar (HOTH et al. 2007).

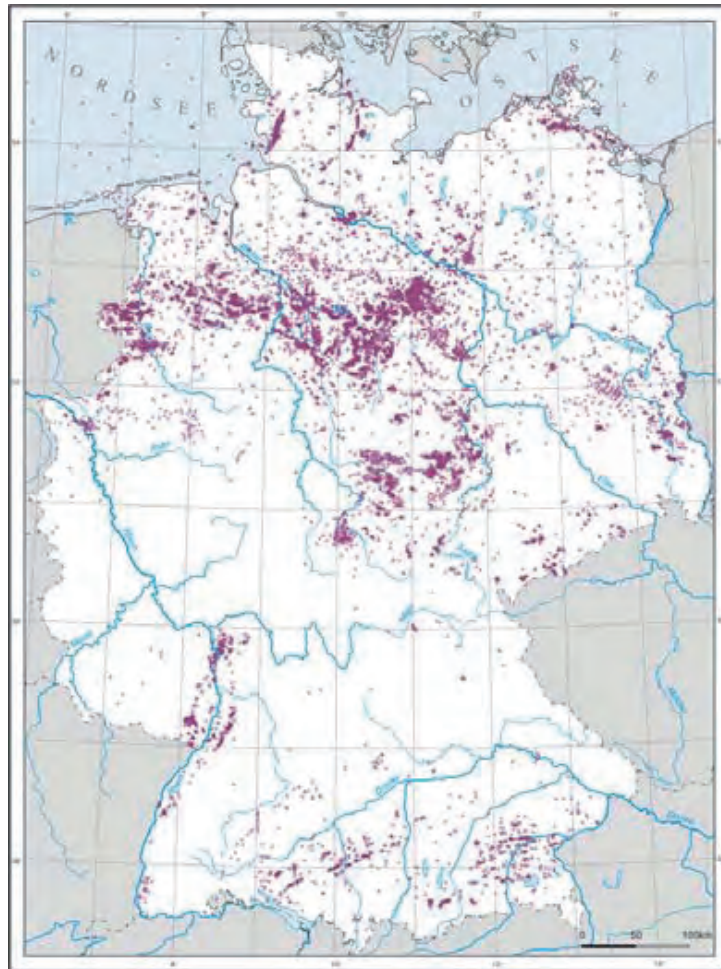


Abb. 3: Übersicht zur Lage der Tiefbohrungen, die für die Bewertung der Tonformationen Deutschlands hinsichtlich ihrer Eignung zur HAW-Endlagerung zur Verfügung standen (HOTH et al. 2007)

Nur in wenigen Ländern existieren bereits im Vorfeld der Standortvorauswahl landesweit oder für Regionen, die wegen der Verbreitung potenziell geeigneter Wirtsgesteinsformationen bzw. im Ergebnis raumordnerischer oder politisch motivierter Überlegungen vorausgewählt wurden, ähnlich detaillierte geologische Kenntnisse wie in Deutschland. In diesen Fällen ist es notwendig, die für die Anwendung der Auswahlkriterien (z. B. tektonischer Bau, seismische Aktivität, Nutzungskonflikte) erforderlichen Daten durch speziell dafür durchgeführte Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Dazu müssen entweder bisher nicht genutzte Daten aus Archiven bzw. Datenbanken zielgerichtet erschlossen oder, wenn dies nicht möglich ist, spezielle geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten durchgeführt werden. Weitgehend unabhängig vom Wirtsgesteintyp umfassen diese Arbeiten vor allem Untersuchungen zu nachfolgend genannten Themenfeldern:

- Auswertung der seismischen Aktivitäten in den Standortregionen durch gezielte Abfragen bei nationalen und internationalen Mess- bzw. Beobachtungsnetzen (z. B. SHEBALIN & LEYDECKER 1997),
- Zusammenstellung der verfügbaren Informationen zur geodynamischen Entwicklung der betrachteten Standortregionen, zu den regionalen Spannungsfeldern und zu Rohstoffvorkommen,
- Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Ausweisung von Lineamenten bzw. mächtigen Störungszonen (z. B. KÜHN & HÖRIG 1995),
- Auswertung bereits vorhandener oder Neuerstellung topographischer, geographischer, geomorphologischer und geologischer Karten zur Abgrenzung von mächtigen Störungszonen sowie zum Nachweis lithologischer Grenzen und bereits bestehender Nutzungen (z. B. Tunnel, Schächte, Stollen, Tagebaue),
- GPS- bzw. Satelliten-gestützte Erfassung von Vertikal- und Horizontalverschiebungen einzelner geologischer Blöcke oder Einheiten zwecks Bewertung ihrer Hebungs- bzw. Absenkungstendenzen und ihrer räumlichen Lageänderungen (z. B. MOROZOV et al. 2007),
- kleinmaßstabige aerogeophysikalische oder an der Erdoberfläche durchgeführte geophysikalische Messungen, z. B. im Maßstab 1 : 200.000, zwecks Abgrenzung von Störungszonen (Abb. 4) sowie zur Entwicklung erster Vorstellungen zum geologischen Tiefenbau, zu den Deckgebirgsmächtigkeiten und zur Verteilung unterschiedlicher Gesteine, z. B. auf der Basis von Schwereanomalien,
- spezielle Auswertung von bisher nicht genutzten Archivunterlagen, Bohrungsdaten bzw. Datenbanken zwecks Ermittlung von Informationen zur räumlichen Verbreitung, Zusammensetzung und zu den Eigenschaften der potenziellen Endlagerwirtsgesteine (z. B. Daten zu Stratigraphie, Lithologie, Mineralogie/Geochemie, zu hydraulischen und petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine),
- geomorphologische Untersuchungen zur Rekonstruktion und Prognose der Erosionsgeschwindigkeiten sowie der langfristigen Hebungs- und Absenkungsprozesse (Gefahr des Freilegens des Endlagers) sowie
- Analyse der langfristigen klimatischen Entwicklung der vorgesehenen Endlagerregion sowie auf aktualistischen Prinzipien beruhende Langzeitklimaprognose (z. B. Gefahr von Vereisungen und eiszeitlichen Rinnenbildungen).

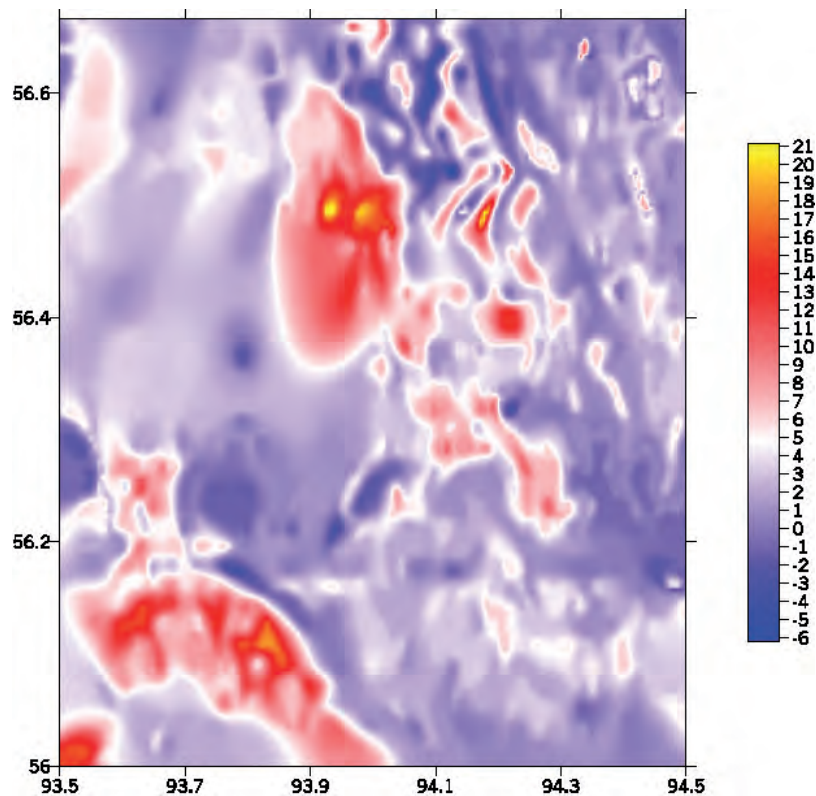


Abb. 4: Ergebnisse aerogeomagnetischer Messungen im Umfeld von Krasnojarsk, Südsibirien, Russland, zur Klärung der Lage von mächtigen Störungszonen in der geplanten Endlagerregion (Karte des anomalen magnetischen Feldes in nT, Maßstab 1 : 200.000, MOROZOV et al. 2007)

Die weitere Vorgehensweise bei der Abgrenzung und Bewertung untersuchungswürdiger, potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneter Standortregionen weist in Abhängigkeit vom ausgewählten Wirtsgesteinstyp spezifische Besonderheiten auf. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Wirtsgesteine (siehe HAMMER et al. 2009) haben gesteinspezifische Auswahlkriterien, Erkundungsziele und übertägige Erkundungsmethoden zur Folge.

2.3 *Wirtsgesteinsspezifische Methoden der Standortvorauswahl*

Die im Ergebnis früher Phasen des Standortsuchverfahrens am eignungshöchsten eingeschätzten Standortregionen müssen zwecks vergleichender Bewertung ihrer Eignung detaillierter untersucht werden. Für die dabei zugrunde gelegten Standortanforderungen und für die Auswahl der Untersuchungsmethoden ist der Wirtsgesteinstyp von entscheidender Bedeutung. Die konkreten Ziele der geologischen Erkundungsarbeiten und die eingesetzten Untersuchungsverfahren werden maßgeblich durch die Eigenschaften der vorgesehenen Wirtsgesteine und vom darauf basierenden Endlagerkonzept bestimmt. Zwecks Aussortierung ungeeigneter Standortregionen müssen neben weitgehend wirtsgesteinsunabhängigen Standortanforderungen zusätzliche, für den jeweiligen Wirtsgesteinstyp charakteristische und in Tab. 1 bis 3 zusammengestellte Lagerstättenparameter überprüft, d. h. erkundet werden.

2.3.1 Standortvorauswahl im Steinsalz

Die maßgeblichen wirtsgesteinsspezifischen Kriterien für die Vorauswahl eines HAW-Endlagerstandortes in Salzstrukturen sind in Tab. 1 enthalten. Ein Großteil der genannten Anforderungen ist für die Salzstrukturen Deutschlands im Rahmen der Standortvorauswahl durch die bereits zu Beginn des Auswahlverfahrens vorhandenen Informationen aus anderen Untersuchungsprogrammen überprüft worden.

Tab. 1: Spezielle Auswahlkriterien für Salzformationen, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen

Spezielle Standortanforderungen für Salzgesteine
Mindestmächtigkeit der Salzformation – 500 m
Mindestfläche – 2-3 km ² (Mindestnettofläche – 0,5 km ² , Filbert et al. 2004)
Lage Top Salzstruktur in ca. 300 m Tiefe
Salzstock darf nicht zu klein und nicht rund bzw. schwach oval sein (d. h. Ausschluss von Salzstöcken mit kompliziertem Internbau, da i.d.R. eine langgezogene, „bohnenförmige“ Salzstruktur durch die dadurch vorhandene Vorzugsrichtung für die Verfallung des Salinars einen relativ einfachen Internbau aufweist)
geringe Salzmächtigkeiten in Randsenken
keine mächtigen Störungszonen im Liegenden der Salzstruktur
möglichst kein subrezent aktives Scheitelgrabensystem im Deckgebirge
keine Überschiebungstektonik und Fehlen intensiver Kompressionstektonik
große, weitgehend homogene Steinsalzbereiche innerhalb der Salzstruktur (dies hat i.d.R. große Abstände des Einlagerungsbereiches von Kalisalzen und Anhydritgesteinen zur Folge)

Bereits Mitte der 1960er Jahre waren in Deutschland alle ca. 200 Salzstrukturen, auch sehr kleine, bekannt. Außerdem existierten im Ergebnis intensiver Explorations- und Bergbautätigkeiten umfangreiche Daten zum geologischen Aufbau von Salzstrukturen und zu den Eigenschaften der Salinargesteine. Alle Strukturen wurden von mindestens einer Profillinie seismischer Messungen gequert, und die meisten wurden durch eine oder mehrere Bohrungen bis in den oberen Bereich der Salzstruktur erkundet. Die seismischen Untersuchungsergebnisse erlaubten eine Lagebestimmung und Abgrenzung der Salzstrukturen sowie eine Bestimmung der Mächtigkeit und des Aufbaus der Schichten im Deckgebirge sowie in den Randsenken. Aus der äußeren Form der Salzstrukturen und den zur Verfügung stehenden Erkundungsbohrungen konnten erste Schlussfolgerungen zum Aufbau und zur Homogenität des Deckgebirges und der Salinarschichten gezogen werden. Diese Daten bildeten die Grundlage für die Bewertung der Salzstrukturen und für ihre Reihung bezüglich ihrer Eignung als Endlagerstandort. Ausführlichere Informationen zur Vorgehensweise und zu den bei der Standortsuche im Steinsalz eingesetzten Untersuchungsverfahren sind für das Beispiel Deutschland in Kap. 3.1.2 und in HAMMER et al. (2009) zusammengetragen.

2.3.2 Standortvorauswahl im Tonstein

Im Unterschied zum Steinsalz, wo durch den Salzstockumriss die Begrenzung des potenziellen Endlagerstandortes vorgegeben wird, sind für tonige Wirtsgesteine aufwändige Untersuchungen zur Ausweisung potenziell geeigneter Einlagerungsfelder innerhalb der vorgesehenen Tonformation erforderlich.

Ausgehend von den in Tab. 2 genannten gesteinspezifischen Auswahlkriterien, ist die Suche nach HAW-Endlagerstandorten in Mitteleuropa auf die Gebiete mit mächtigen mesozoischen Tonformationen, i.d.R. im Deckgebirge großer Plattformgebiete, eingegrenzt. Große Teile Mitteleuropas haben im Verlaufe ihrer mesozoischen Entwicklungsgeschichte (vor ca. 250 bis 65 Mio. Jahren) eine z. T. beträchtliche Absenkung erfahren. In den sich dadurch gebildeten Beckenstrukturen wurden große Sedimentmächtigkeiten akkumuliert, die im Verlaufe ihrer weiteren geologischen Entwicklung nur relativ gering metamorph überprägt wurden. Beispiele hierfür sind das Norddeutsche Becken oder das Pariser Becken.

Tab. 2: Spezielle Auswahlkriterien für Ton/Tonstein, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen

Spezielle Standortanforderungen für Ton/Tonsteine
Mindestmächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches innerhalb einer möglichst mächtigen Ton/Tonsteinformation – 100 m (HOTH et al. 2007)
Mindestfläche – ca. 8 km ² (JOBMANN et al. 2007), Mindestnettofläche – ca. 4,5 km ² (FILBERT et al. 2004)
Tiefe größer 300 m und kleiner 1000 m (HOTH et al. 2007)
möglichst flache Lagerung der Tonformation
keine Tonschiefer, d. h. keine intensiv metamorph überprägten tonigen Gesteine, für die z. T. eine intensive Klüftung und ein stark erhöhter Inkohlungsgrad der organischen Bestandteile charakteristisch sind
keine Gebiete mit erhöhtem geothermischem Gradienten
keine mächtigen Störungszonen im Deckgebirge und in der Tonformation selbst
möglichst nicht in unmittelbarer Nähe von Salzstrukturen, da dort häufig eine steile Lagerung der Tonschichten zu beobachten ist (schlechte Prognostizierbarkeit und möglicherweise Grundwassermigration entlang der Schichtungsflächen)
möglichst geringe C _{org} -, Karbonat- und Wassergehalte zwecks Reduzierung von Alterations- und Gasbildungsprozessen unter dem Einfluss der Wärme entwickelnden Abfälle
möglichst hohe Gehalte an Tonmineralen mit hohem Sorptionsvermögen (z. B. Montmorillonit anstelle von Illit oder Sericit)

In der Schweiz werden der jurassische (etwa 160 Mio. a alte) Opalinuston und in Frankreich die Tonsteine des Callovo-Oxfordian (ebenfalls jurassischen Alters) als prinzipiell für die HAW-Einlagerung geeignet eingestuft. Ebenso wie in diesen Ländern finden sich auch in Deutschland potenziell geeignete Tonformationen nicht im Bereich des Grundgebirges, sondern in den mächtigen Sedimentschichten von Beckenstrukturen (z. B. des Norddeutschen Beckens). Ausgehend vom lithologischen Aufbau dieser Sedimentschichten scheinen die Gesteine des unteren und mittleren Jura in Nord- und Süddeutschland sowie der Unterkreide in Norddeutschland für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle prinzipiell geeignet zu sein (HOTH et al. 2007). Große Teile der Opalinuston-Vorkommen in Süddeutschland befinden sich allerdings im Einflussbereich bedeutender Karst-Grundwasserleiter, was ebenso ungünstig für ihre Nutzung als Endlagerwirtsgestein ist, wie die Nähe zu seismisch aktiven Zonen (z. B. Oberrheintalgraben, Abb. 5).

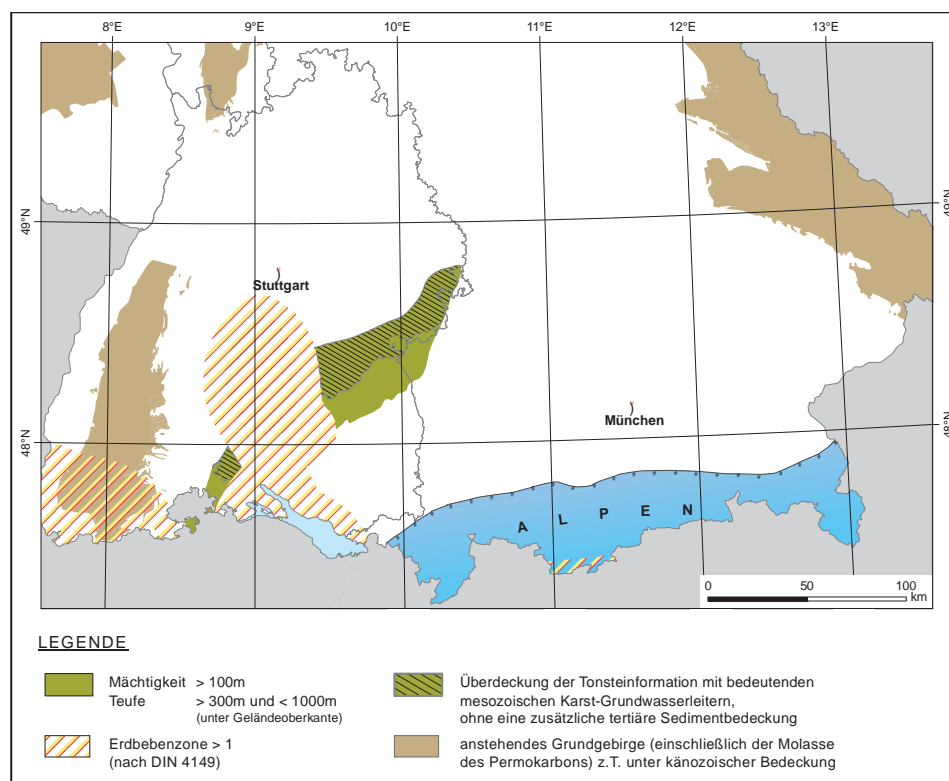


Abb. 5: Reduzierung der Verbreitungsfläche der prinzipiell für die HAW-Endlagerung geeigneten süddeutschen Opalinuston-Vorkommen infolge von ungünstigen geologischen Rahmenbedingungen (Karstgrundwasserleiter, seismische Gefährdung; Quelle: BGR)

Die darüber positionierten Tertiärtone erreichen in Deutschland oft nicht die geforderte Mindesttiefe (300 m) und Mindestmächtigkeit (100 m, HOTH et al. 2007). Die norddeutschen Rupeltone des Oligozäns stellen ein wichtiges Schutzgut dar, da sie die geologische Barriere gegen aufsteigendes Salzwasser bilden, d. h. zum Schutz der nicht versalzten Grundwässer dienen. Auch ihr geringer Verfestigungsgrad steht einer Nutzung als

Endlagerwirtsgestein entgegen. Die ebenfalls nur gering verfestigten Tertiärtonne im Alpenvorland sind zusätzlich aufgrund ihrer großen lithologischen Variabilität nur schwer charakterisier- und prognostizierbar, was auch ungünstig für den Bau eines HAW-Endlagers ist.

Bezüglich der Informationsdichte zu Tonformationen ist zwischen Nord- und Süddeutschland ein „Datengefälle“ zu beobachten. In Norddeutschland ist die Datendichte aufgrund der intensiven Erdöl- und Erdgasexploration insgesamt sehr groß, aber nicht homogen. Die für die Anwendung der Ausschluss- und Abwägungskriterien verwendbaren Daten liegen größtenteils bereits in aufbereiteter Form vor. In Süddeutschland erfolgten nur wenige Explorationsarbeiten auf Erdöl/Erdgas und Steinsalz. Deshalb ist die Datendichte zu den darüber positionierten Tonformationen sehr heterogen und insgesamt wesentlich geringer als in Norddeutschland. Nur einige Gebiete, wie z. B. Oberrheintalgraben und Molassebecken, lassen flächenhafte Darstellungen geologischer Strukturen zunächst in kleinem Kartenmaßstab (1 : 500.000, 1 : 200.000) zu.

Die Überprüfung des Erfüllungsgrades der in Tab. 2 genannten geologischen Anforderungen an untersuchungswürdige Tongesteinsformationen erfolgte in Deutschland vor allem anhand von Archivdaten zur regionalen Geologie. Neben den Daten aus Karten und Archivmaterialien, die allerdings Lücken in der Datenquantität und -qualität aufwiesen, waren vor allem die Bohrungen und die Resultate bohrlochgeophysikalischer Untersuchungen, die im Rahmen der Erdöl-, Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundungen niedergebracht wurden sowie in geringerem Umfang die Daten aus Forschungs- und Kartierungsbohrungen die Grundlage für die Charakterisierung der Tongesteinsformationen im tieferen Untergrund Deutschlands. Kenntnisse über die In-situ-Gesteinseigenschaften von Tonformationen liegen nur vereinzelt aus Tunnelbauprojekten und aus der Erkundung des Umfeldes des Endlagers Konrad vor. In vielen Fällen waren die Tongesteinsformationen nicht das primäre Ziel der Untersuchungen, sondern Teil der untersuchten Sedimentbecken, da sie häufig die abdichtenden Schichten von Erdöl/ Erdgaslagerstätten bilden.

Insbesondere die Auswertung von Bohrlochlogs lässt sich sehr gut für eine erste lithologische Erfassung und mineralogisch-geochemische Charakterisierung von Tongesteinsformationen nutzen. Die Auswertung der Bohrungsdaten gestattet Aussagen zur faziellen Ausbildung und zur Homogenität bzw. Mächtigkeit der Gesteinsschichten sowie eine Abschätzung des Tonanteils und die Bestimmungen der hydraulischen Eigenschaften der Tonformationen. Außerdem lassen sich mittels Korrelation der Bohrlochlogs Aussagen über die flächige Verbreitung der Schichten machen. Die Interpretation von seismischen Untersuchungen liefert Informationen über den Schichtverlauf (Einfallen, Versatz an Störungszonen) und zum strukturellen Bau im tiefen Untergrund. Häufig können bereits

vorhandene ältere seismische Daten mit Hilfe neuer Auswerteverfahren optimaler verarbeitet und so die Datenqualität verbessert werden. Die Ergebnisse seismischer Profilmessungen bildeten zum Beispiel eine wichtige Grundlage für die Erfassung und Charakterisierung von Störungen sowie für die Bestimmung ihrer Tiefenreichweite.

2.3.3 Standortvorauswahl im Kristallin

Tab. 3: Spezielle Auswahlkriterien für Kristallin, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen

Spezielle Standortanforderungen für kristalline Wirtsgesteine
Tiefe größer 300 m und möglichst kleiner 1000 m
Mindestfläche größer 10 km ² (da infolge des Vorkommens von Störungszonen häufig Aufteilung in mehrere Bereiche notwendig ist)
altes Plattformgebiet, möglichst keine Hinweise auf intensive alpidische bzw. variszische Orogenesen
geringe Klüftung und Ausschluss von Gebieten mit mächtigen Störungszonen
niedrige sowie nur gering mit der Teufe variierende und in ihrer räumlichen Orientierung möglichst stabile Gebirgsspannungen
keine Rand- bzw. Kontaktbereiche von Magmatitkomplexen
geringe Häufigkeit von magmatischen Gängen und Xenolithen
möglichst geringe Heterogenität und geringe Anisotropie der Gesteinseigenschaften
geringe Grundwasserneubildungsrate und möglichst niedriger Grundwasserspiegel
möglichst intensiv metasomatisch überprägte Gesteine (Tonmineralbildung), wobei die Alterationsprodukte nicht auf rezente, sondern auf alte Prozesse zurückgeführt werden können

Wie Tab. 3 zeigt, erfolgt die Ausweisung potenziell geeigneter Standortregionen in kristallinen Wirtsgesteinen vor allem auf der Grundlage struktur- und hydrogeologischer Informationen, insbesondere zur Verteilung und zu den hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen sowie zur Klüftigkeit der Gesteine. Diese Daten liegen in vielen Ländern im Ergebnis regionalgeologischer Studien bereits vor oder müssen nur noch partiell ergänzt werden. Dabei erfolgt die Lokalisierung mächtiger Störungszonen im kristallinen Basement auf der Grundlage kleinmaßstabiger geologisch-geophysikalischer Erkundungsarbeiten. Dazu zählen z. B. die Auswertung von Satelliten- und Luftbildaufnahmen im Maßstab 1 : 200.000 bis 1 : 100.000 (z. B. Landsat 1) oder die Durchführung von gravimetrischen und aeromagnetischen Messungen im Maßstab 1 : 200.000.

Außerdem sind im Rahmen von Übersichtsstudien zur Abgrenzung vermutlich geeigneter Gesteinsformationen, d. h. zur Vorauswahl von Standortregionen, vor allem Untersuchungen zum Vorkommen neotektonisch aktiver Deformationszonen (z. B. mittels GPS- oder Satelliten-gestützter Messverfahren, siehe MOROZOV et al. 2007) sowie zu den hydraulischen Gradienten, zur Grundwasserchemie und zur Erzführung der Gesteine erforderlich. So z. B. kamen in frühen Phasen der Standortsuche in Finnland folgende Untersuchungsmethoden zum Einsatz (POSIVA 2005):

- Auswertungen von Luftbild- und Satellitenaufnahmen,
- Felduntersuchungen (strukturgeologische und lithologische Kartierungen),
- Interpretation von topographischen u. a. Karten zur Ausgliederung von Störungszonen sowie
- aerogeophysikalische (geomagnetische und radiometrische) und an der Erdoberfläche durchgeführte Radar- und Seismik-Messungen.

Die Datendichte ist bei Kristallingesteinen zu Beginn des Standortauswahlverfahrens i.d.R. relativ gering. Sie ist in direktem Maße davon abhängig, ob die Kristallinvorkommen lagerstättenhöflich sind. Wurden Lagerstätten erkundet oder abgebaut, so liegen meist umfangreiche Daten zu den Gesteinen vor. Häufig werden zur flächendeckenden Charakterisierung größerer Kristallingebiete in Ermangelung anderer Informationen die Daten aus der Erkundung von Kristallin-Vorkommen im Umfeld von Lagerstätten oder Erkundungsbohrungen auf Bereiche in größerer Tiefe und Entfernung extrapoliert. Wie das Beispiel der fehlerhaften Übertragung der geologischen Verhältnisse im Schwarzwald auf das Kristallin im Untergrund der Nordschweiz zeigt, ist dies häufig mit erheblichen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten verbunden.

Die sich aus der schlechten Prognostizierbarkeit von Kristallinkomplexen (insbesondere hinsichtlich des Vorkommens von Störungszonen) ergebende Notwendigkeit einer detaillierten Ermittlung von standortbezogenen Daten erfordert, ähnlich wie für tonige Wirtsgesteine, sehr aufwändige Untersuchungen und einen erheblichen Zeitaufwand. So z. B. wurde bei der Suche nach einem HAW-Endlagerstandort im Kristallin der Nordschweiz ab 1982 in einer etwa 1200 km² großen Untersuchungsregion ein sehr aufwändiges geowissenschaftliches Erkundungsprogramm durchgeführt. Die Untersuchungen beinhalteten umfangreiche Bohrarbeiten und die Durchführung großflächiger seismischer Messungen. Sie dienten in erster Linie zur Abklärung der Eignung des kristallinen Grundgebirges als Endlagerwirtsgestein und zur Abgrenzung möglicher Standortgebiete. Die bis 1985 vorliegenden Ergebnisse bildeten die Grundlage für die im Projekt „GEWÄHR“ gezogenen geologischen, bau- und sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen. Nach Abschluss der Arbeiten wurden die Resultate in einem Synthesebericht zusammenfassend veröffentlicht (THURY et al. 1994) und durch eine sicherheitstechnische Beurteilung ergänzt (NAGRA 1994a, ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009).

Mit den Untersuchungen in Tiefbohrungen und den seismischen Messungen sind immer auch Daten über die Sedimentgesteine des paläozoischen Sockels sowie des mesozoischen und tertiären Deckgebirges erhoben worden. Als nach Einreichung des Projekts „GEWÄHR“, neben der Weiterführung des Kristallinprojekts, die Option der tonigen Sedimentgesteine verstärkt in die Evaluation einbezogen wurde, verfügte man infolge dessen bereits über einen gut fundierten Wissensstand über das sedimentäre Deckgebirge. Auf der Grundlage dieser Daten wurde bereits 1994 das Zürcher Weinland als bevorzugte Standortregion für den Bau eines HAW-Endlagers im Opalinuston festgelegt.

3 Standorterkundung

Die kriteriengestützte Auswahl eines HAW-Endlagerstandortes mit günstigen mineralogisch-geochemischen, petrophysikalischen und hydrogeologischen Wirtsgesteinseigenschaften und einem struktureologisch-tektonisch geeigneten Umfeld erfordert umfangreiche geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten. Sie dienen vor allem zur Ermittlung von standortbezogenen Basisdaten, auf deren Grundlage die Durchführung einer standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse (safety case) erfolgt. Diese muss den Nachweis erbringen, dass aufgrund der Eigenschaften des vorgesehenen Multibarrierensystems, bestehend aus der geologischen sowie zusätzlichen technischen und geotechnischen Barrieren, die Abfälle ohne schädliche Einflüsse auf die Biosphäre (end) gelagert werden können. Außerdem liefert die geologische Erkundung die notwendigen standortbezogenen Daten zur Entwicklung bzw. Optimierung des Endlagerkonzeptes sowie, gestützt auf das geologische Lagerstättenmodell, für die Planung und Durchführung des Endlagerbaus, inklusive Klärung der bautechnischen Machbarkeit.

Endlagerkonzepte, in denen wie im Steinsalz und Tongestein die geologische Barriere die Hauptlast bei der Gewährleistung des langzeitsicheren Einschusses der Radionuklide trägt, erfordern für die Standortentscheidung eine andere Vorgehensweise bei der geologischen Erkundung als Standortauswahlverfahren im Kristallin. In magmatischen oder hochmetamorphen Wirtsgesteinskomplexen beruht der Schwerpunkt bei der langzeitlichen Absicherung der Isolation der Abfälle auf der Wirkung technischer und geotechnischer Barrieren (z. B. Endlagerbehälter, siehe z. B. HAMMER 2008, JOBMANN et al. 2008). Die geologische Barriere nimmt im Vergleich zu Steinsalz und Tongestein in den Endlagerkonzepten für kristalline Gesteine eine untergeordnete Stellung ein.

Aufgrund der geringeren Bedeutung der geologischen Barriere im Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Kristallin und einer im Regelfall annähernd homogenen Gesteinszusammensetzung konzentrieren sich die geologischen Standorterkundungsarbeiten in diesen Gesteinen vordergründig auf strukturgeologische bzw. gefügeanalytische Untersuchungen. Ziel ist die Ausweisung von Gesteinsbereichen geringer Klüftigkeit und Wasserdurchlässigkeit, die möglichst weit entfernt von mächtigen, potenziell reaktivierbaren Störungszonen liegen. Analysen der petrographischen bzw. mineralogisch-geochemischen Ausbildung der kristallinen Gesteine, der räumlichen Veränderlichkeit ihrer mineralogischen Zusammensetzung und der daran gebundenen Heterogenität ihrer Eigenschaften spielen im Kristallin im Gegensatz zum Salz in den meisten Standortauswahlverfahren nur eine untergeordnete Rolle.

Für die Auswahl und bergmännische Erschließung von Endlagerstandorten in Salz- oder Tonformationen sind dagegen neben Informationen zum strukturgeologischen Bau der Salz- oder Tonsteinvorkommen detaillierte Kenntnisse zur Lithologie und Mineralogie der Gesteine, zu ihrer Homogenität sowie zur räumlichen Veränderlichkeit der Zusammensetzung und der Eigenschaften der Wirtsgesteine erforderlich.

Die geologisch-geophysikalische Standorterkundung muss folgende Informationen als Entscheidungsgrundlage für die Eignungsbewertung und die endgültige Auswahl des Endlagerstandortes zur Verfügung stellen:

- Geometrie des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (z. B. Tiefenlage, Ausdehnung, Mächtigkeit),
- strukturgeologischer und tektonischer Bau des Standortes (Trennflächengefüge, Vorkommen und Eigenschaften von Störungszonen, Faltenbau, neotektonische Aktivitäten, Hebungs-/Senkungsraten),
- hydrogeologische Standortbedingungen, wie z. B. Geochemie der Grundwässer, Vorkommen wasserführender Störungszonen/Klüfte, hydraulische Gradienten, Porenwasserdruck, hydraulische Durchlässigkeiten der Störungen, präferenzielle Fließwege, Alter und Genese der Grundwässer,

- Gefüge, Homogenität, Porosität und mineralogisch-geochemische Zusammensetzung der Wirtsgesteine und des Nebengebirges,
- petrophysikalische Parameter und physikochemische Barriereigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine, wie z. B. Festigkeit, Verformung, Kriechvermögen, hydraulische und thermische Eigenschaften, Chemismus der Gesteine und Porenwässer, Lösungs- und Gasführung, Diffusion, Lösungsverhalten, Sorptionsvermögen,
- verlässliche Aussagen bezüglich der Charakterisierung der Wirtsgesteinseigenschaften,
- regionales Spannungsfeld, In-situ-Spannungsverhältnisse und geodynamische Entwicklung der Region,
- Erosionsintensität,
- Seismizität der Region,
- bergbautechnische Machbarkeit sowie
- mögliche Rohstoffvorkommen, die einen Konflikt zur Endlagernutzung darstellen können.

Die Anforderungen an die einzusetzenden Untersuchungsmethoden, den Umfang, die Tiefe sowie die notwendige Qualität der Erkundungsarbeiten ergeben sich ausgehend von den Daten, die für den Langzeitsicherheitsnachweis, die Optimierung des Endlagerkonzeptes sowie die bau- und sicherheitstechnische Planung des Endlagers notwendig sind (WALLNER et al. 2005). Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten bei der Beweisführung des langzeitsicheren Einschusses der Abfälle sollten möglichst alle für den Sicherheitsnachweis benötigten Parameter aus Untersuchungen am zu bewertenden Standort stammen.

Wesentlichen Einfluss auf die Vorgehensweise bei der über- und untertägigen Standorterkundung sowie die eingesetzten Untersuchungsverfahren hat der Wirtsgesteinstyp. Die unterschiedlichen mineralogisch-geochemischen und petrophysikalischen Barriereigenschaften der Gesteine bestimmen maßgeblich die jeweiligen Standortauswahlkriterien (siehe HAMMER et al. 2009) und definieren die gesteinspezifischen Erkundungsziele. So z. B. hängt die im Ergebnis der geologischen Erkundung nachzuweisende Mindesteinlagerungsfläche entscheidend von der Temperatur- bzw. Wärmeleitfähigkeit der Gesteine ab. Die Größe der Fläche und die an sie gestellten Anforderungen bestimmen die bei der Erkundung einzusetzenden geologisch-geophysikalischen Untersuchungsverfahren.

Das Untersuchungskonzept zur Standorterkundung ist außerdem abhängig vom bereits vorhandenen Kenntnisstand zum geologischen Aufbau des potenziellen Endlagerstandortes. Häufig liegen im Ergebnis großflächiger Rohstoffexplorationen oder regionalgeologischer Studien bereits umfangreiche Daten zum geologischen Tiefenbau vor. Diese müssen für ihre Nutzung im Rahmen von Endlagerprojekten ggf. speziell ausgewertet oder reprozessiert werden.

3.1 *Übertägige Standorterkundung*

Die übertägige Standorterkundung erfolgt mit dem Ziel, grundlegende Erkenntnisse über die Verbreitung und die Lagerungsverhältnisse der potenziellen Endlagerwirtsgesteine und das Deck- bzw. Nebengebirge sowie erste Informationen zur Gesteinszusammensetzung und zu den struktur- bzw. hydrogeologischen, geochemischen und geomechanischen Gegebenheiten am Standort zu erlangen. Diese Daten bilden die Grundlage für die, im Verlaufe des Standortauswahlverfahrens vorzunehmende kriteriengestützte Bewertung von Standortalternativen. Die Ergebnisse dienen der Planung der untertägigen Erkundungsarbeiten und der Präzisierung des Endlagerkonzeptes. Die Daten der übertägigen Standorterkundung stellen die Basis für die Erarbeitung erster, i.d.R. noch überwiegend generischer Modellvorstellungen für den vorläufigen Langzeitsicherheitsnachweis dar.

Trotz internationaler Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung gibt es in Anbetracht der standort- und wirtsgesteinsspezifischen Besonderheiten jedes Landes kein weltweit abgestimmtes einheitliches Vorgehen bei der übertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten. Art und Umfang der übertägigen Standorterkundung werden vom Wirtsgesteinstyp und den darauf basierenden wirtsgesteinsabhängigen Erkundungszielen sowie vom bereits erreichten Kenntnisstand zur Standortgeologie und zu den Barriereigenschaften der Wirtsgesteine und des Deck- bzw. Nebengebirges bestimmt. Im Regelfall wurden für die detailliert zu erkundenden Standorte in früheren Phasen des Auswahlprozesses (Standortvorauswahl; siehe Kap. 2) die verfügbaren Altdaten bereits ausgewertet. Dazu zählen z. B. geologische Kartierungsergebnisse, Bohrungen, Resultate regionaler geophysikalischer Studien und von Fernerkundungsarbeiten. Durch einen Vergleich dieser Datenzusammenstellungen mit einer Auflistung der Informationen, die für den standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweis und die Entwicklung des Endlagerkonzeptes notwendig sind, wird deutlich, welche geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten noch durchgeführt werden müssen (WALLNER et al. 2005).

3.1.1 Methoden der übertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Steinsalz, Tonstein und Kristallin

Im Verlaufe der Standorterkundung erfolgt die Durchführung der geologisch-geophysikalischen Untersuchungen in einem kleineren Maßstab (meist 1 : 50.000 oder 1 : 25.000) und auf räumlich enger begrenzten Gebieten als bei der Standortvorauswahl (siehe Kap. 2). Die wesentlichsten Methoden zur übertägigen Standorterkundung sind:

- geologische und geomorphologische Oberflächenkartierung, ggf. nach Entfernung der Bodenschicht und unter Einbeziehung von Schürfen sowie flachen, bis ca. 10 m tiefen Bohrungen,
- Präzisionsmessungen des Oberflächenreliefs (Abb. 6) und spezielle Auswertung von geologischen Kartenwerken zwecks Identifizierung von Störungszonen und lithologischen Grenzen,
- Auswertung von Luftbildaufnahmen bzw. Fernerkundungsdaten zur Abgrenzung von mächtigen, möglicherweise neotektonisch aktiven Störungszonen (Abb. 7),
- aerogeophysikalische Messungen, z. B. zur Bestimmung der Lagerungsverhältnisse und der Mächtigkeit sedimentärer Deckgebirgsschichten oder zum Nachweis von mächtigen Störungszonen (Abb. 8),
- geodätische Präzisionsnivellements und/oder Satelliten- bzw. Flugzeuggestützte Messungen (z. B. mittels GPS) zwecks Bestimmung der Hebungs- und Senkungsraten einzelner geologisch-tektonischer Blöcke (Abb. 9),
- von Übertage ausgeführte tiefreichende Erkundungsbohrungen und geophysikalische Untersuchungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen (Log-Messungen) zur Analyse des geologischen Baus des Fernfeldes und des Wirtsgesteins,
- hydrogeologische Messungen in den Erkundungsbohrungen zwecks Analyse der Grundwasserströmungsverhältnisse und der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine im Nah- und Fernfeld des geplanten Endlagers,
- felsmechanische und thermophysikalische Untersuchungen an Bohrkernproben,
- Bestimmungen der In-situ-Stressbedingungen, z. B. mittels Überbohrversuchen,

- geochemische Untersuchungen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und des Deck- bzw. Nebengebirges sowie
- geochemische Untersuchungen der Grundwässer, z. B. zur Bestimmung der Grundwasserdynamik und -verweilzeiten oder zum Nachweis von Mixingprozessen.

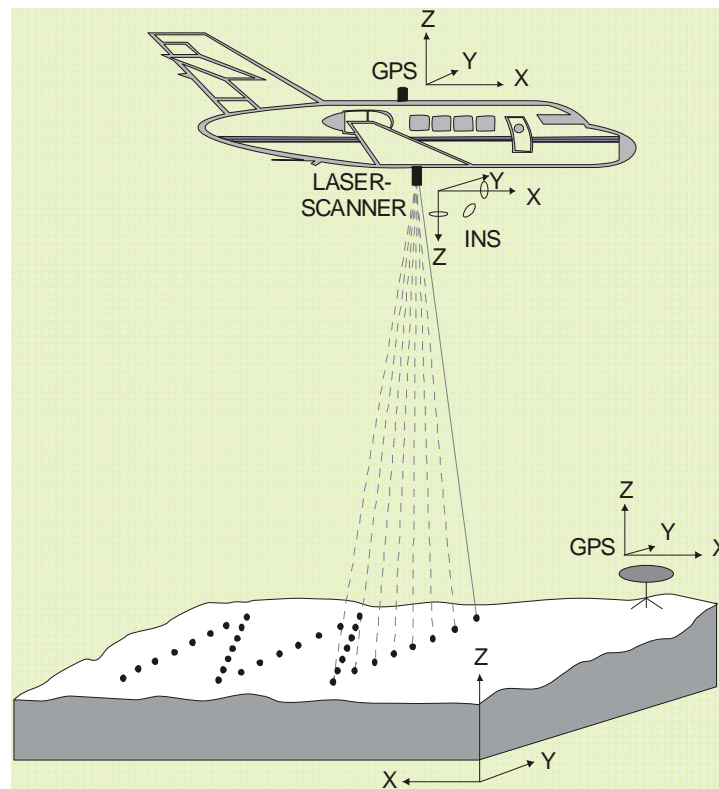


Abb. 6: Prinzipskizze zur Durchführung von Flugzeug-gestützten Laser-Scan-Befliegungen zwecks Erarbeitung eines hoch aufgelösten Oberflächenreliefs (z. B. zum Nachweis von mächtigen Störungszonen; Quelle: BGR)

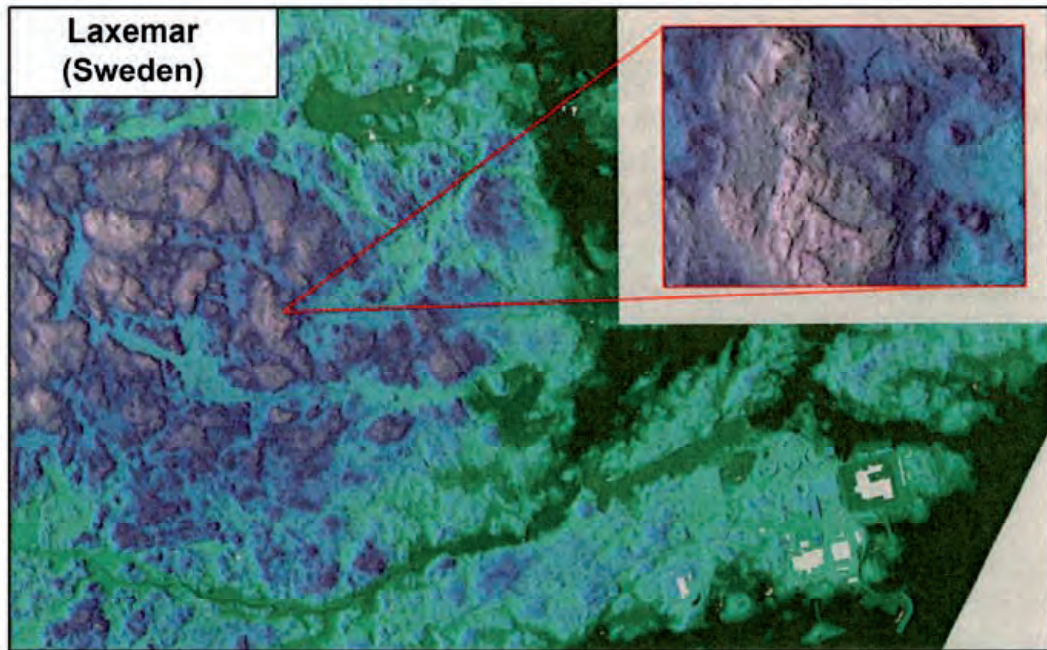


Abb. 7: Ergebnisse des Einsatzes eines Flugzeug-gestützten Laser-Scanners zur detaillierten Erfassung des Oberflächenreliefs am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Oskarshamn (Laxemar, SKB 2005a). Das hoch aufgelöste Höhenmodell ermöglicht, ggf. unter Hinzunahme anderer, z. B. geophysikalischer Befunde, den Nachweis von Bruchstrukturen und, bei regelmäßiger Wiederholung, ein Monitoring von Blockbewegungen entlang von Störungszonen.

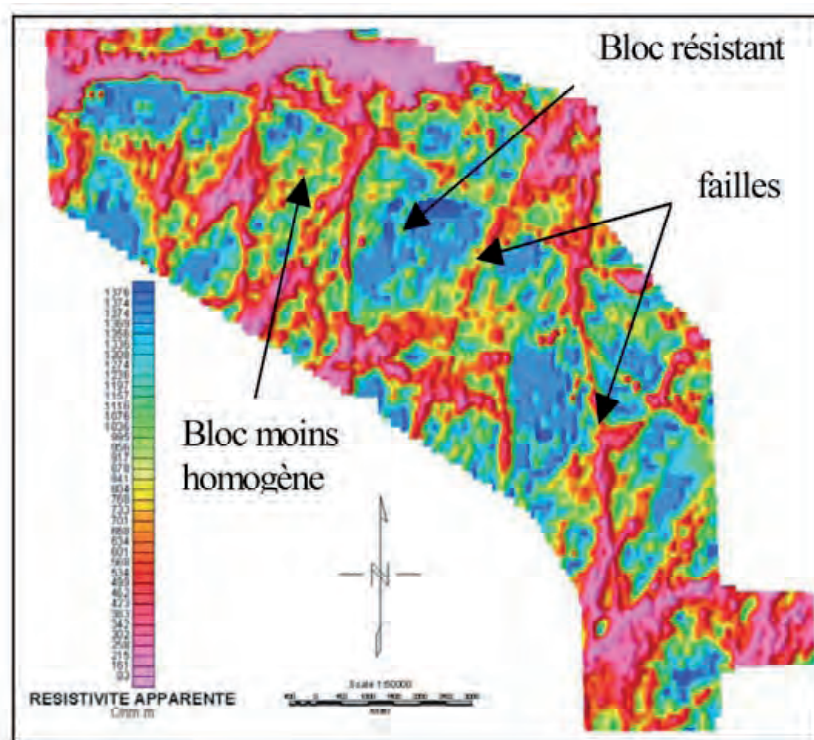


Abb. 8: Nachweis von mächtigen Störungszonen in einem detailliert hinsichtlich seiner Eignung für die HAW-Endlagerung untersuchten französischen Granitmassiv mittels Hubschrauber-gestützter geoelektrischer Messungen (ANDRA 2005a)

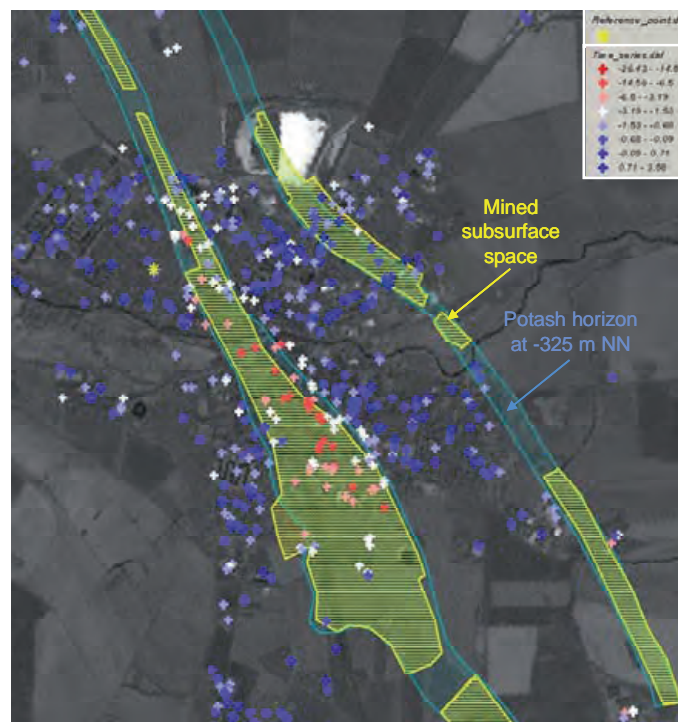


Abb. 9: Anwendung von PS-InSAR-Messungen zur Bestimmung von vertikalen Messpunktverschiebungen, in diesem Beispiel verursacht durch Nachsackprozesse oberhalb von einstürzenden Grubenräumen (Quelle: BGR)

Die geologischen Kartierungsarbeiten haben vor allem das Ziel, die lithologische Schwankungsbreite und die Verteilung der unterschiedlichen Gesteinstypen zu erfassen. Gemeinsam mit Fernerkundungsdaten und geophysikalischen Untersuchungsbefunden ermöglichen sie die Abgrenzung mächtiger, grundwasserführender Störungszonen sowie eine Bestimmung des Kluffinventars (inklusive Kluffüllungen) und dessen räumlicher Orientierung. Sie dienen auch dazu, die mittels geophysikalischer Messverfahren festgestellten Anomalien zu verifizieren und dafür notwendige Proben zu nehmen.

Einen wichtigen Stellenwert hat im Zuge der übertägigen Erkundungsarbeiten die hydrogeologische Charakterisierung des potenziellen Endlagerstandortes (siehe IAEA 1999). Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen stehen die Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse im Deck- und Nebengebirge, d. h. die Ausweisung bzw. Abgrenzung von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern, sowie die Analyse der Grundwasserbeschaffenheit (z. B. Eh-pH-Verhältnisse, Sauerstoffsättigung, chemische Zusammensetzung und Alter der Grundwässer). Im Ergebnis der übertägigen hydrogeologischen Standorterkundung liegen detaillierte Informationen zur Geometrie der Grundwasserfließsysteme, zu den hydraulischen Eigenschaften der hydrostratigraphischen Einheiten (Transmissivität, Permeabilität, Porosität) sowie zu den aktuell ablaufenden Grundwasserbewegungen (u. a. Pumpversuche und Tracereexperimente) vor. Wichtig für die langzeitsicherheitliche Bewertung des Endlagerstandortes sind Prognosen zur

Änderung der Grundwasserfließverhältnisse durch klimatische oder geodynamische Prozesse (z. B. Vereisungen, Überflutungen, tektonische Hebungen oder Absenkungen, Änderung der Spannungsverteilungen und Neubildung bzw. Reaktivierung von Störungszonen) sowie zum Einfluss der Einlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen auf die Grundwasserfließverhältnisse.

Neben Untersuchungen in geologischen Aufschlussbohrungen werden hierfür häufig spezielle flächendeckende Bohrprogramme für hydrogeologische Bohrungen, Pegelbohrungen oder Brunnen sowie geophysikalische Methoden eingesetzt (siehe z. B. SCHREINER & KREYSING 1998, LANGGUTH & VOIGT 2004). Der Einsatz der verschiedenen Methoden und der Umfang der Untersuchungen richten sich nach den regionalen geologischen Verhältnissen bzw. dem geologischen Aufbau des Deckgebirges und seinen Eigenschaften sowie nach der Größe des Untersuchungsgebietes. Die Endteufen der hydrogeologischen Bohrungen bleiben zum Schutz der geologischen Barriere i.d.R. deutlich über der Topfläche des Wirtsgesteins. Zur Beweissicherung und zum Monitoring der Grundwasserverhältnisse werden Dauermessstellen eingerichtet und regelmäßig gemessen. Die im Standortbericht 2 Gorleben (KLINGE et al. 2007) zusammengefassten Ergebnisse sind ein sehr gutes Beispiel für die hydrogeologische Erkundung des Deckgebirges über einem potenziellen Erkundungsbergwerk für ein mögliches Endlager in einem Salzstock.

Zur Bestimmung der hydrogeologischen Standortrandbedingungen werden im Deckgebirge bzw. an den Gesteinen des Fernfeldes u. a. folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Permeameterversuche (Lockergesteine),
- Einschwingversuch (Porengrundwasserleiter),
- Pumpversuche (Porengrundwasserleiter und Kluftwasserleiter),
- Bohrlochkranzversuche (LIEDTKE et al. 1994),
- Tracertests,
- Injektionstests (z. B. SKB 2007),
- Korngrößenanalysen,
- Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit und zu den Sorptions- bzw. Diffusionseigenschaften der Gesteine (z. B. NAGRA 1999, 2004) sowie
- geophysikalische Bohrlochmessungen.

Einer der Schwerpunkte der hydrogeologischen Standortcharakterisierung ist die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes (K- oder kf-Wert), d. h. die quantitative Bewertung der Wasserdurchlässigkeit der Gesteine. Dies erfolgt entweder in Labortests oder unter In-situ-Verhältnissen in Bohrungen. Durch die Einbeziehung anderer Gesteinsparameter lassen sich aus dem kf-Wert weitere hydrogeologische Parameter ableiten (Transmissivität, Permeabilität). Unter Nutzung der realen Standorterkundungsdaten werden auf der Grundlage der geologisch-hydrogeologischen Standortmodelle mittels numerischer Modellrechnungen die hydraulischen Verhältnisse abgebildet und mögliche Schadstoffmobilisationen bzw. -transporte berechnet.

Die wesentlichsten Ziele der bei übertägigen Erkundungen von Endlagerstandorten sehr häufig eingesetzten geophysikalischen Untersuchungen sind:

- Bestimmung der räumliche Ausdehnung, der Tiefenlage und Mächtigkeit der geologischen Schichten,
- Abgrenzung stratigraphischer oder fazieller bzw. petrographischer Einheiten,
- Erkundung der Lagerungsverhältnisse der Gesteine,
- Nachweis von Störungs- und Klüftzonen,
- Nachweis von Hohlräumen und Auflockerungsbereichen,
- Erkundung der räumlichen Lage des Grundwasserspiegels, der wasserführenden Schichten und Klüftsysteme,
- Erkundung von geophysikalischen Anomalien sowie
- Bestimmung physikalischer Eigenschaften u. Ableitung von Gesteinsparametern (Festigkeit, Dichte, Elastizität).

Die oberflächlich eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Wirtsgestein. Während bei Standorterkundungen im Steinsalz vorwiegend seismische Untersuchungsverfahren zur Abgrenzung der Struktur und zur Analyse des Deck- und Nebengebirges eingesetzt werden, finden im Kristallin bevorzugt geoelektrische und elektromagnetische Methoden zum Nachweis von hydraulisch aktiven Störungszonen Anwendung. Durch eine Kombination mehrerer geophysikalischer Methoden kann die Zuverlässigkeit der sich daraus ergebenden geologischen Aussagen gesteigert werden.

In frühen Phasen des Auswahlverfahrens werden in allen Wirtsgesteinstypen von Übertage ausgeführte, z. T. sehr tiefe Erkundungsbohrungen eingesetzt. Anzahl, Tiefe und Erkundungsziele der Bohrungen richten sich nach den konkreten Standortgegebenheiten. Ein rastermäßiges Abbohren des Standortgebietes, wie es häufig bei der Lagerstätten erkundung eingesetzt wird, ist bei der Erkundung von potenziellen Endlagerstandorten nicht zielführend, da eine solche Vorgehensweise die geologische Barriere schädigt. Hauptziel der auf der Grundlage der bereits existierenden geologischen Modellvorstellungen positionierten Bohrungen ist die Erkundung der lithologischen Abfolge und der Mächtigkeit des Deckgebirges und des Nebengesteins, der Ausdehnung und Zusammensetzung des Wirtsgesteins sowie der Nachweis von möglicherweise im Umfeld des geplanten Endlagerstandortes vorkommenden mächtigen, hydraulisch aktiven Störungszonen.

Zu der im Rahmen der Langzeitsicherheitsmodellierungen erforderlichen Charakterisierung der Grundwasser-führenden Schichten im Deck- und Nebengebirge des Wirtsgesteins werden meist zahlreiche Bohrungen abgeteuft, die nicht bzw. nur wenige Meter in das Wirtsgestein reichen. Am Standort des Erkundungsbergwerkes Gorleben wurden über 300 hydrogeologische Bohrungen zur Erkundung des Deck- und Nebengebirges der Salzstruktur niedergebracht. Zusätzlich wurden 44 Salzspiegelbohrungen realisiert, die vor allem zur Erkundung des Aufbaus und der Eigenschaften des Hutgesteins der Salzstruktur dienen (siehe Abb. 14).

3.1.2 Übertägige Erkundung von Salzformationen

Ausgehend von den Auswahlkriterien (siehe Kap. 2.3.1 und HAMMER et al. 2009) und den Daten, die für den Eignungs- bzw. Langzeitsicherheitsnachweis für einen HAW-Endlagerstandort in Salzformationen erforderlich sind, ist die übertägige Erkundung von Salzformationen auf folgende Themenschwerpunkte ausgerichtet:

- äußere Form der Salzstruktur,
- Erarbeitung einer lokalen stratigraphischen Gliederung,
- räumliche Verbreitung und Tiefenlage der Salzgesteine,
- Tiefenposition und strukturelogischer Bau des Sockels, z. B. der Zechsteinbasis (Zerblockungsgrad, mächtige überregionale sowie lokale Störungszonen im Liegenden der Salzstruktur),
- erste Informationen zum Internbau der Salzstruktur, wie z. B. Baustil, Heterogenität, Mächtigkeit und Verteilung der Steinsalzschieben, Ausbildung und Häufigkeit von Kalisalzen und Anhydritlagen,

- lithologische Zusammensetzung und Mächtigkeiten der Schichten im Nebengebirge bzw. in den Randsenken und daraus ableitbare Schlussfolgerungen zur Entwicklung des Salzstocks (z. B. Aufstiegsgeschwindigkeiten und Entwicklungsstadium eines Salzstocks),
- Daten zur Intensität der natürlichen Ablaugung (ungefähre Ablaugungsraten), zur Mächtigkeit und zum Aufbau des Hutgesteins,
- struktur- und hydrogeologische Analyse des Deckgebirgsaufbaus, wie z. B. Vorhandensein von Scheitelgräben, Verbreitung von Grundwasserleitern und -hemmern, hydraulische Eigenschaften der Gesteine, Vorkommen von quartären Rinnen oder Subrosionssenken,
- regionales Temperaturfeld und Temperaturen im geplanten Endlagerniveau,
- Ergebnisse spezieller hydrogeologischer Untersuchungen in den Schichten des Deckgebirges (hydraulische Gradienten, Hydrochemie der Grundwässer, Grundwasserverweilzeiten),
- seismische Aktivitäten in der Nähe des geplanten Endlagers, Vorkommen neotektonisch aktiver Störungszonen sowie
- Hebungs- bzw. Senkungsraten von geologischen Einheiten im Umfeld des Salzstockes.

Die liegenden und hangenden Schichten einer Salzformation können zusätzlich zur geologischen Barriere der Salzgesteine weitere geologische Barrieren bilden. Allerdings können sandige, stärker permeable Schichten als Exfiltrationspfade wirken. Zwecks Bewertung ihrer Rolle im Multibarrierensystem und Klärung der Rückhaltefunktionen des Deck- und Nebengebirges im Endlagerfernfeld sowie zur Einschätzung ihres Einflusses auf die Endlager-Langzeitsicherheit bzw. auf das Endlagerkonzept müssen die Eigenschaften dieser geologischen Einheiten und ihre sicherheitstechnische Relevanz überprüft werden.

Ausgehend von den genannten Erkundungszielen wird für die übertägige Erkundung von Salzstöcken eine Kombination von Reflexionsseismik (möglichst 3D und eventuell ergänzt durch gravimetrische Messungen), Erkundungsbohrungen (inklusive Bohrlochgeophysik) und detaillierter geochemisch-mineralogischer Bearbeitung der gewonnenen Bohrkerne eingesetzt, die sich aus vier Schritten zusammensetzt (z. B. JARITZ 1979, 1983; BORNEMANN et al. 2008).

Schritt 1: Reflexionsseismik

Reflexionsseismische Untersuchungen sind die wichtigsten übertägig durchgeführten geophysikalischen Messungen bei der Erkundung eines Salzstandortes. Zwecks Untersuchung endlagerrelevanter Besonderheiten des Deckgebirges kommen gelegentlich noch geoelektrische oder elektromagnetische Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Die seismischen Messungen liefern flächenhafte, räumliche Informationen zur äußeren Form und zur Lage der Top- bzw. Basisflächen der Salzstruktur (Abb. 10). Außerdem gestattet eine qualitätsgesicherte Durchführung der Seismik Aussagen zu folgenden Parametern:

- Lage und Ausbildung der Flanken,
- strukturgeologischer Aufbau und Mächtigkeit des Deckgebirges (z. B. Störungszonen-Nachweis, Lagerungsverhältnisse der Sedimentschichten),
- Abfolge, Lagerungsverhältnisse und Mächtigkeit der Sedimentschichten in den Randsenken,
- Ausbildung des Hutgesteins (Lage des Salzspiegels, Aufbau des Hutes),
- Größe und Veränderlichkeit der dynamischen Parameter Elastizitätsmodul und Poissonzahl.

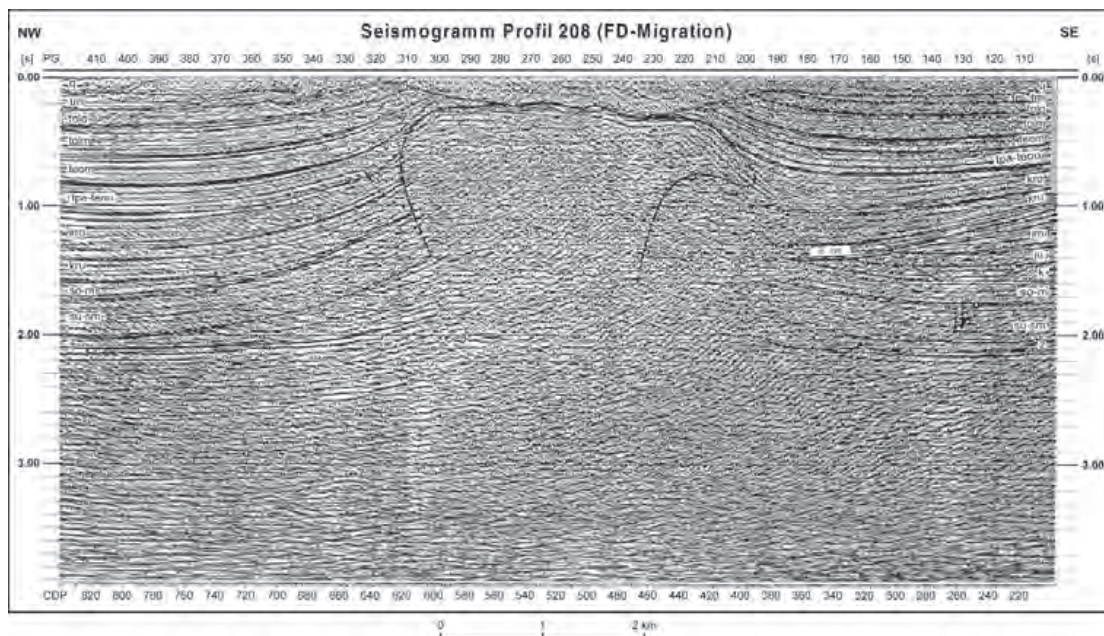


Abb. 10: Typisches, noch nicht tiefenmigriertes Seismogramm für den Salzstock Gorleben (ZIRNGAST 1990). Gut erkennbar ist der Salzstocküberhang an der SE-Flanke der Salzstruktur.

Die seismischen Daten sind u. a. wichtig für die hydrogeologische Bewertung des Endlagerstandortes und für erste Schlussfolgerungen zum Aufbau (z. B. Vorhandensein von Salzstocküberhängen oder Salzeinspießungen in das Nebengebirge) sowie zur geologischen Entwicklung der Salzstruktur (z. B. Aufstiegs Geschichte von Salzstöcken, Aufstiegsraten). Häufig werden zur Erfassung der geologischen Strukturen im Deckgebirge, wie z. B. Mächtigkeitsschwankungen einzelner Schichtpakete und Vorkommen von Störungszonen bzw. Migrationswegen für Grundwässer sowie der lateralen Ausdehnung der Salzstöcke die seismischen Messungen durch gravimetrische, seltener durch geomagnetische Messungen ergänzt. Die konkrete Methodenauswahl ist abhängig von der Mächtigkeit und Zusammensetzung (z. B. elektrische Leitfähigkeit) des Deckgebirges. Die Schwermessungen können auch zu einem besseren Verständnis des Internbaus des Salzstockes (z. B. Hauptanhydritverteilung im Salzstock und Abtrennung des Hutes) und der Ausbildung des Kontaktes Salzstock – Deckgebirge beitragen.

Der Punktabstand auf den seismischen Messprofilen ist von der Tiefenlage der Salzstockoberkante abhängig. Bei Tiefen größer 300 m beträgt der Punktabstand meist 500 m, bei geringeren Tiefen 250 m. Die reflexionsseismischen Untersuchungen werden, wenn möglich, als 3D-Seismik durchgeführt. Zur Vermeidung von häufig zu beobachtenden geologischen Fehlinterpretationen der Seismogramme (z. B. fehlerhafte Tiefenmigration, falsche geologische Ansprache von Reflektoren, siehe FOLLE 2007) sollten die reflexionsseismischen Untersuchungen durch VSP-Messungen (Vertical Seismic Profiling) in Bohrungen ergänzt werden.

Falls nur Linienseismik möglich ist, sollten mehrere parallele Linien senkrecht zum Streichen der Struktur angeordnet sein sowie eine Linie im Streichen im Top der Struktur und zwei Linien parallel zur Struktur im Nebengestein. Die Auslagen der Linien sollten lang genug sein, damit die Flanken der Salzstruktur hinreichend überdeckt werden und somit in den seismischen Profilen erkennbar sind. Die Überdeckung im Bereich des Salzstockrandes muss ausreichen, um den Übergang vom Salz zum Nebengestein abzubilden. Die Eindringtiefe ist so zu wählen, dass sichere Aussagen über die Salzbasis möglich sind. Die Seismik sollte die Qualität haben, um eine Massenbilanzierung (Balancing) durchführen zu können. Hieraus ergeben sich Aussagen zur Entstehung und eventuell zur Langzeitsicherheit der Salzstruktur.

Schritt 2: Erkundungsbohrungen

Zur weiteren Erkundung des Internbaus des Salzkörpers sollten tiefe Erkundungsbohrungen gestoßen werden. Zwecks Schonung der geologischen Barriere werden zwei bis vier Bohrungen empfohlen. Bei Salzstöcken ist eine Verteilung der Bohrungen über die ganze Salzstockfläche unabdingbar, um Aussagen über die gesamte Schichtenfolge im Diapir zu erhalten. Ausgehend von der meist einfachen antiklinalen Struktur der

für den Endlagerbau potenziell geeigneten Salzstöcke und den daran gebundenen großen Mächtigkeiten des fließfähigsten Steinsalzes im Zentralbereich, drohen bei einer Beschränkung der Bohrungen auf den Zentralteil des Salzstocks sehr eintönige Schichtenprofile. Diese lassen nur wenige Schlussfolgerungen zum Internbau des Salzstocks und zur Salinarstratigraphie zu. Einzelne Bohrungen sollten das Liegende der Salzstruktur erreichen, um einen vollständigen Überblick über den stratigraphischen und strukturellen Aufbau der Salzformation sowie die lithologische Zusammensetzung der Basisschichten zu erhalten.

Bei der Ausführung der Erkundungsbohrungen müssen folgende Rahmenbedingungen eingehalten werden:

- Gewährleistung einer permanenten geologischen Betreuung und Beaufsichtigung der Bohrarbeiten,
- gewissenhafte Führung und regelmäßige Kontrolle des Bohrjournals,
- Bohrungen werden durchgehend gekernt von Top Hutgestein bis deutlich unterhalb des geplanten Einlagerungsbereiches,
- Fotodokumentation der Bohrkerne und schnelle Überführung der Salzkerne in ein klimatisiertes Bohrkernlager,
- Sicherstellung einer hohen Qualität der Bohrkerne und eines, wenn überhaupt, nur sehr geringen Kernverlustes durch geringe Bohrgeschwindigkeiten und möglichst niedrige Anpressdrücke,
- Entnahme von Kernmärschen mit Schichtorientierungen ca. alle 50 bis 100 m zur besseren Rekonstruktion des Internbaus,
- Vermessung des räumlichen Bohrlochverlaufes,
- geophysikalische Bohrlochmessungen (Log-Messungen),
- besondere Vorsicht bei Gas- und Lösungszutritten sowie Durchführung von Beprobungen, Mengmessungen und von Druck- bzw. Zuflusstests zur Bestimmung der Reservoirgröße,
- geochemische Charakterisierung der Gas- und Lösungsproben (Entstehung, Herkunft, Alter der Gase und Lösungen) und Übertragung der Analyseergebnisse in spezielle Datenbanken.

Der Einsatz geophysikalischer Messmethoden in den Bohrungen ermöglicht Aussagen zur Lithologie, Stratigraphie und Porosität der Gesteine sowie die Lokalisierung von Schichtgrenzen, Klüften und Störungszonen. Bei der Durchführung der geophysikalischen Bohrlochmessungen wird als Minimalvariante eine Kombination von Gamma-Ray-Log,

Density-Log, Sonic-Log, Temperatur-Log und Kaliber-Log empfohlen. Wenn möglich, sollten diese Verfahren zwecks eindeutigerer Interpretation der Messergebnisse und zur besseren Ansprache der Gesteinsschichten durch EMR-Messungen, Widerstands- bzw. Eigenpotenzialmessungen sowie durch Neutron-Neutron-Messungen ergänzt werden. Die Ergebnisse dieser Messverfahren gestatten eine genauere Charakterisierung des Porenraumes und der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine im Deckgebirge und im Salinar.

Im Wirtsgestein Salz liefern akustische und elektromagnetische Messverfahren, wie z. B. VSP- (Vertical Seismic Profiling) und EMR-Messungen (Electromagnetic Reflection Tool), umfangreiche Informationen zum geologischen Aufbau der Strukturen (Abb. 11). VSP-Messungen in den Bohrungen werden zur Verbesserung der Auswertung der überträgigen reflexionsseismischen Messungen empfohlen. Außerdem ermöglichen mittels Georadar durchgeführte Crosshole-Tomographie-Messungen eine genauere Erkundung von Störungszonenverläufen im Deck- und Nebengebirge zwischen den dafür genutzten Bohrungen. Besonders wichtige Daten zur Rekonstruktion des Internbaus von Salzstrukturen stellen richtungssensitive Radarmessungen zur Verfügung (Abb. 12, EISENBURGER et al. 2006). Sie können sowohl in bergmännischen Auffahrungen als auch in Bohrungen durchgeführt werden. Die Effektivität des Einsatzes von Georadarmessungen hängt von den Unterschieden in den elektrischen Leitfähigkeiten der Gesteine ab und ist in Gesteinen mit geringen Leitfähigkeiten (z. B. Salz und Kristallin) besonders gut. In salinaren Formationen liefern sie wertvolle Informationen zur räumlichen Lage von Anhydrit- und Ton-haltigen Schichten oder Kaliflözen.

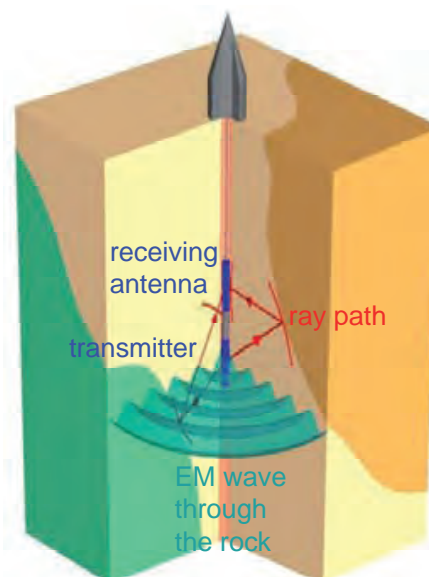


Abb. 11: Schematische Darstellung für die Durchführung und Auswertung von Radarmessungen in vertikalen Erkundungsbohrungen zum Nachweis lithologischer Grenzen bzw. Kontaktflächen (Quelle: BGR)

Zusätzlich durchgeführte Televiever-Befahrungen (optisches oder akustisches Bohrlochfernsehen) gestatten eine genauere Detektierung von Klüften und Bohrlochrandausbrüchen. Der Einsatz von Televiever-Verfahren erfordert allerdings eine transparente Bohrspülung oder ein trockenes Bohrloch. Zur besseren Charakterisierung der Temperatur- und Redoxbedingungen in den unterschiedlichen Gesteinsschichten bieten sich In-situ-Messungen von Eh, pH, elektrischer Leitfähigkeit, gelöstem Sauerstoff und Temperatur mittels Einsatz einer Bohrlochsonde, z. B. vom Typ „SKB CHEMMAC-Probe“ oder „JAEA Geochemical Probe“ an.

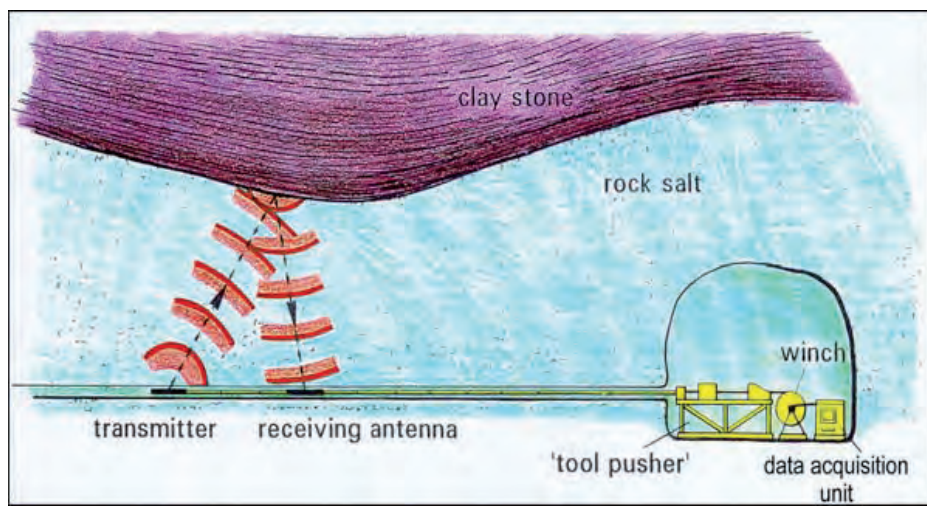


Abb. 12: Prinzip der Radarmessungen in einer horizontalen Erkundungsbohrung im Salz (Quelle: BGR)

Schritt 3: Geologische Bearbeitung der gewonnenen Bohrkern

Struktur- und Gefügeanalysen der Gesteine anhand von, wenn möglich, geschnittenen Bohrkernen erlauben, gepaart mit mineralogisch-geochemischen Untersuchungen, Aussagen zur Veränderung der mineralogischen Zusammensetzung und zur Verteilung der Gesteinskomponenten sowie zum Vorkommen von Klüften bzw. Störungszonen und zu eventuell existierenden Kluftmineralisationen (Kluftfüllung bzw. -belag). Die petrographisch-mineralogischen Untersuchungen der Bohrkern, die möglichst mit mikroskopischen, röntgendiffraktometrischen und geochemischen Analysen kombiniert werden sollten, dienen außerdem zur Analyse der Deformationsprozesse beim Salzaufstieg und erlauben damit wichtige Rückschlüsse auf die Genese der Gesteine. Die Bohrkern sollten wie folgt untersucht werden:

- Fotolog der Bohrkern im Durch- und Aufsicht, eventuell ergänzt durch Detailaufnahmen einzelner Kernbereiche,
- Beschreibung des Gesteins im Durch- und Aufsicht in Bezug auf die Verteilung und die Gehalte einzelner Minerale,

- stratigraphische Einordnung der Schichten,
- Beschreibung des Gesteinsgefüges (z. B. sedimentär, diagenetisch verändert, deformiert, umkristallisiert, Störungen),
- Bestimmung der Lagerungsverhältnisse der Sedimente sowie Erfassung und statistische Auswertung der räumlichen Lage von Klüften oder Inhomogenitäten,
- Erstellung von detaillierten Schichtenverzeichnissen der Bohrungen.

Auf der Grundlage der Bearbeitung der Bohrkerne sind spezielle geologische Auswertungen und eine Reihe von, für die Eignungsaussage bzw. den Endlagerbau bzw. den Langzeitsicherheitsnachweis erforderlichen Schlussfolgerungen möglich, wie z. B.:

- Erarbeitung von Bohrprofilen,
- stratigraphische Gliederung der im Diapir vorkommenden Schichtenfolge und Ableitung der Schichtmächtigkeiten sowie Erstellung eines stratigraphischen Standardprofils für die Salzstruktur,
- stratigraphische Korrelation der Schichten in den Erkundungsbohrungen,
- Erstellung von Bohrungsschnitten,
- Entwicklung erster Vorstellungen zum strukturellen Internbau des Diapirs,
- Aussagen zur Ausbildung und Mächtigkeit des Hutgesteins (unter Einbeziehung der geophysikalischen Daten),
- Beantwortung der Frage, an welche Gesteine Gas- und Lösungsvorkommen gebunden sind.

Schritt 4: Geochemisch-mineralogische und petrophysikalische Bearbeitung der Bohrkerne

Zur Ergänzung der im Ergebnis der Schritte 1 bis 3 erzielten Untersuchungsergebnisse zum Aufbau der Salzstruktur sowie zu den Eigenschaften und den Bildungsbedingungen der Gesteine werden folgende Untersuchungen an den Bohrkernen empfohlen:

- Analyse der Gehalte der chemischen Hauptkomponenten zur Bestimmung des quantitativen Mineralbestandes der Salzgesteine (Na, K, Mg, Mg im alkoholischen Auszug, Ca, Cl, SO₄),
- Erstellung eines geochemisch-mineralogischen Standardprofils auf der Grundlage des stratigraphischen Standardprofils (als Einzelproben in einem vom Schichtenaufbau abhängigen Abstand),

- Analyse ausgewählter Spurenelemente als genetische Indikatoren:
 - **Br** - zur stratigraphischen Feingliederung der salinaren Schichtenfolge und zur Charakterisierung der Bildungsbedingungen (primär oder sekundär),
 - **Rb** - Charakterisierung der Bildungsbedingungen der kaliumhaltigen Salzminerale (primäre oder sekundäre Bildung),
 - **Sr** - Analyse der Bildungsbedingungen der calciumhaltigen Salzminerale (primär oder sekundär),
 - Die Bestimmung der Bromidgehalte ist unbedingt notwendig, während die Analyse von Rb und Sr an bestimmte Fragestellungen, wie z. B. die Untersuchung von Deformations- bzw. Rekristallisationsprozessen gebunden ist.
- Analyse der stabilen Isotope $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$:
 - $\delta^{34}\text{S}$ - stratigraphische Zuordnung von Sulfaten,
 - $\delta^{18}\text{O}$ – Bildungstemperaturen sowie Genese von Gipsgesteinen und Calciumkarbonaten,
 - $\delta^{13}\text{C}$ – Genese der Karbonate und stratigraphische Zuordnung.
 - Die Analyse von $\delta^{34}\text{S}$ ist unbedingt erforderlich, während die Bestimmung von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ an spezielle Fragestellungen zur Genese der Salzgesteine gebunden ist,
- mineralogisch-geochemische Analyse der in den Salzgesteinen vorkommenden Kluftmineralisationen zur Klärung ihrer Genese und ihres Alters,
- Analyse der chemisch-physikalischen Schadstoffrückhalteeigenschaften der Gesteine des Nah- und Fernfeldes (z. B. Bestimmung des Sorptions- bzw. Komplexbildungsvermögens, der Diffusionseigenschaften und der Eh-pH-Verhältnisse).
- Bei bestimmten genetischen Fragestellungen, wie z. B. Nachweis von Rekristallisations- und Deformationsprozessen, Bildung sekundärer Mineralphasen bei der Alteration der Gesteine und Nachweis akzessorischer Minerale bzw. Präzisierung des Mineralbestandes, ist die Anfertigung von Dick-, Dünn- oder Mikrosonden- bzw. Rasterelektronenmikroskopschliffen notwendig.
- Analyse der geomechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften der Gesteine.

Parallel zu den geochemisch-mineralogischen Analysen werden Laboruntersuchungen zur Bestimmung der gebirgsmechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine sowie der Gesteine des Deck- und Nebengebirges durchgeführt. Dazu zählen z. B. Triaxial-, Uniaxial- und Scherversuche zur Bestimmung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten zur Ableitung der dynamischen elastischen Gesteinseigenschaften, Untersuchungen der Porosität, Porengeometrie, des Sättigungsverhaltens und der Permeabilität der Gesteine sowie Bestimmungen der Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeausdehnung.

Auf der Grundlage dieser Daten wird das Endlagerkonzept auf die standortspezifischen Besonderheiten ausgelegt. Außerdem sind auf der Basis dieser standortbezogenen Informationen im Rahmen von vorläufigen Langzeitsicherheitsanalysen Standsicherheitsbewertungen im Hinblick auf eine mögliche Erdbebengefährdung und Reaktivierung von im Umfeld der Salzstruktur eventuell vorkommenden Störungszonen möglich. Die Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten der Wirtsgesteine sind auch außerordentlich wichtig für die Entscheidung zum Standort der Schächte für das Untertagelabor bzw. das Erkundungsbergwerk (JARITZ 1983).

3.1.3 Übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben

Als Beispiel für eine sehr gründliche und aufwändige übertägige Standorterkundung im Steinsalz gilt die im Zeitraum 1979 bis 1985 durchgeführte geologisch-geophysikalische Erkundung des Salzstocks Gorleben. Mit dem Ziel der Klärung des geologisch-hydrogeologischen Aufbaus des Deckgebirges (z. B. Verteilung der Grundwasserleiter und -hemmer) und der Rekonstruktion der Lagerungsverhältnisse der Sedimente im Deck- bzw. Nebengebirge der Salzstruktur sowie des strukturell-tektonischen Bauplans des Salzstockes wurden umfangreiche reflexions- und flachseismische Messungen durchgeführt und zahlreiche Erkundungsbohrungen niedergebracht.

Für die detaillierte Bewertung der Salzstruktur standen zu Beginn der Arbeiten die Ergebnisse der seit Anfang der 50er Jahre im Auftrag der Erdöl-/Erdgas-Industrie oberflächlich durchgeführten umfangreichen reflexionsseismischen Messungen zur Verfügung. Diese Arbeiten waren auf das Rohstoffpotenzial der Sedimente in den Randsenken der Salzstöcke ausgerichtet und lieferten wertvolle Informationen zum strukturellen Bau der Salzstrukturen und ihres Umfeldes. 1984 erfolgte zusätzlich auf 16 Oberflächenprofilen längs und quer zum Salzstock Linienseismik (Gesamtprofillänge 150 km, Abb. 13). Dies ermöglichte eine bessere Abgrenzung des Salzstockes und eine detaillierte Erkundung des Nebengebirges. Auf der Grundlage dieser Daten erfolgte die Rekonstruktion der geologischen Entwicklung des Standortes im Verlaufe der Erdgeschichte (ZIRNGAST 1985, KÖTHE et al. 2007, BORNEMANN et al. 2008).

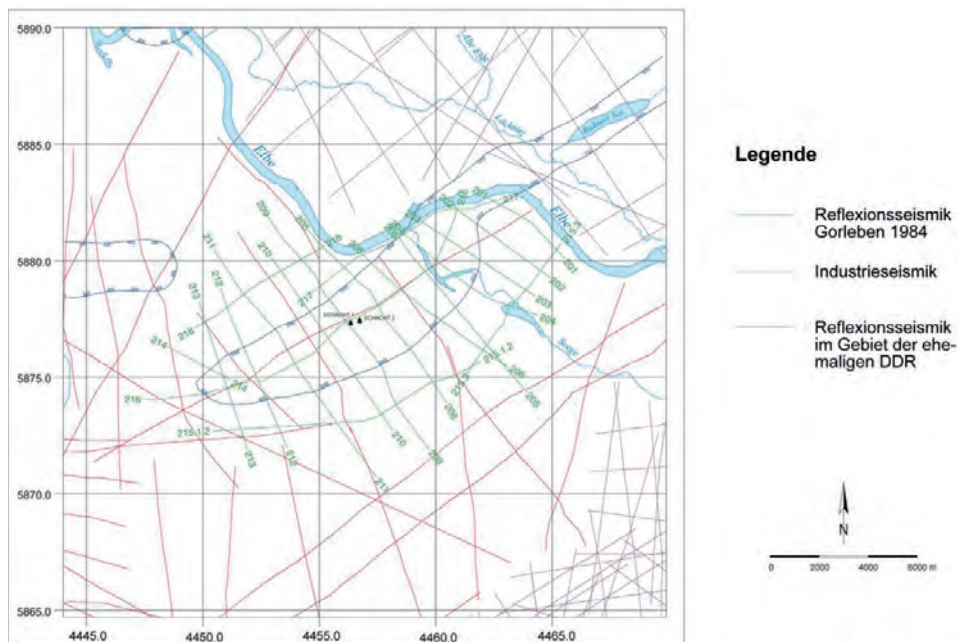


Abb. 13: Anordnung der seismischen Profile zur Untersuchung der Salzstruktur Gorleben sowie seines Deck- und Nebengebirges (seismische Untersuchungen der Erdöl/ Erdgas-Industrie - rote Linien). Die seismischen Daten dienten als Grundlage für die Bewertung des Salzstocks z. B. hinsichtlich Tiefenlage, äußerer Form, Randsenkenmächtigkeit und Deckgebirgsaufbau (BORNEMANN et al. 2008)

Parallel zu diesen Arbeiten wurden auf einer Fläche von ca. 300 km² vier Tiefbohrungen zur Salzstockerkundung, 44 Salzspiegelbohrungen, zwei Schachtvorbohrungen und etwa 470 Bohrungen zur hydrogeologischen Erkundung und Überwachung des Deckgebirges angeordnet (Abb. 14, JARITZ 1983, BORNEMANN 1991, BORNEMANN et al. 2008). Bei der Festlegung der Anzahl und der Standorte für die vier, etwa 2000 m tiefen Erkundungsbohrungen (Go 1002, Go 1003, Go 1004 und Go 1005; Januar 1980 bis März 1981) wurde darauf geachtet, die geologische Barriere möglichst wenig oder gar nicht zu beschädigen. Außerdem sollten die um die Bohrungen erforderlichen Sicherheitspfeiler möglichst weit vom geplanten Einlagerungsbereich für die Abfälle entfernt sein (JARITZ 1983). Deshalb und aufgrund der zu erwartenden homogenen Zusammensetzung des Zentralsattels des Salzstocks wurden die tiefen Erkundungsbohrungen im Übergangsbereich zwischen Zentralsattel und Flanken des Salzstocks angeordnet. Bei Standorten im Zentralbereich hätten die Bohrungen nur wenige Informationen zur Stratigraphie und zum internen Bau des Salzstocks geliefert. Standorte nahe am Rand des Salzstocks entfielen, da dort zu erwarten war, dass intensiv verfalltete und lithologisch sehr heterogen aufgebaute Schichtenfolgen dominieren.

Die Tiefbohrungen wurden im Bereich der Salzgesteine fast vollständig gekernt, etwa alle 50 bis 100 m wurden orientierte Kerne zur eindeutigen Bestimmung der Lagerungsverhältnisse der Sedimente entnommen. Die Bohrungen lieferten wichtige Informationen bezüglich der Verbreitung und faziellen Ausbildung einzelner Salzsichten und zum Internbau der Salzstruktur. Die Salzspiegelbohrungen (zwischen 1979 und 1985) reichten 10 bis maximal 70 m in das Salzgebirge. Sie dienten zur Charakterisierung der natürlichen Ablaugungsvorgänge am Top des Salzstockes und lieferten umfangreiche Daten zum geologischen Aufbau des Übergangsbereiches Deckgebirge – Salzstock, d. h. zum Hutgestein und zum Salzspiegel. Auf der Grundlage dieser Daten wurden die am Salzspiegel ausstreichenden Schichten erfasst und die geologische Karte im Niveau des Salzspiegels erstellt (BORNEMANN 1991, BORNEMANN et al. 2008).

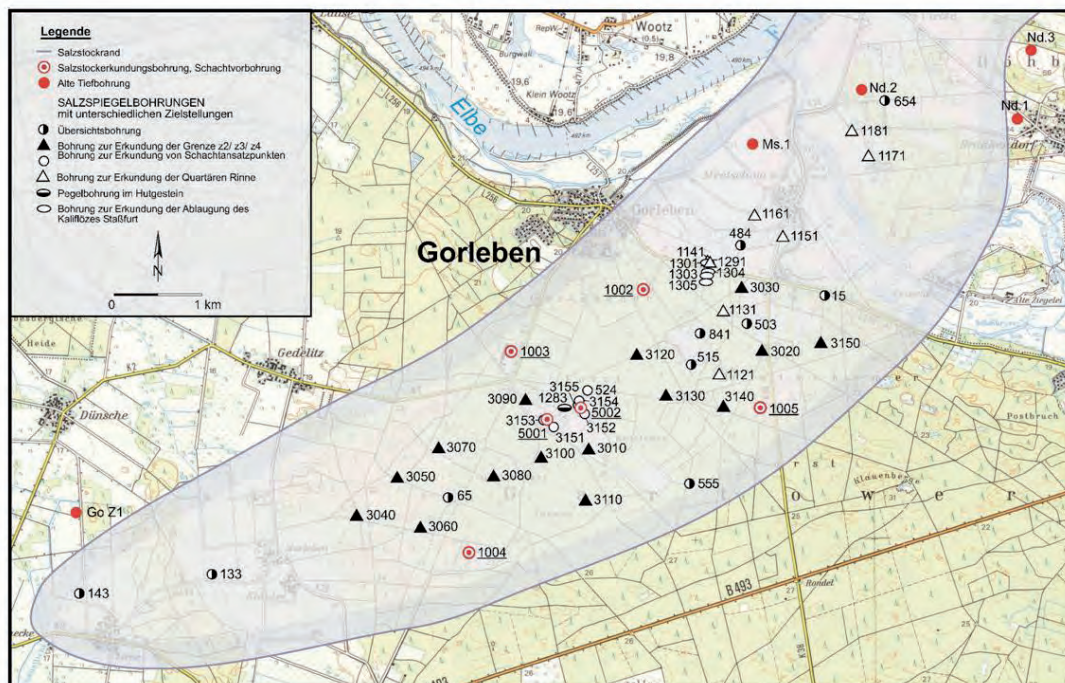


Abb. 14: Lageplan der zur Charakterisierung des Salzstocks Gorleben und seines Umfeldes durchgeführten geologischen Erkundungsbohrungen (BORNEMANN et al. 2008)

Basierend auf allen bis dahin vorhandenen geologisch-geophysikalischen Daten wurden 1982 im zentralen Teil des Salzstocks zwei Schachtvorbohrungen (Go 5001 und Go 5002) bis in eine Tiefe von ca. 1000 m niedergebracht. Der Zentralbereich ist durch nur geringmächtige Ton-, Anhydrit- und Kalisalzschichten sowie die Dominanz von im Vergleich zu Staßfurt-Steinsalz langsamer kriechenden Leine-Steinsalzen charakterisiert (JARITZ 1983). Die genannten Rahmenbedingungen wurden der Auswahl der Schachtstandorte zugrunde gelegt, um den negativen Folgen der häufigen Trennflächen in tonigen Gesteinen, der Laugenführung und relativ großen Sprödigkeit Anhydrit-haltiger Schichten und der geringen Druckfestigkeit sowie hohen Hygroskopie von Kalisalzen vorzubeugen.

In den meisten Bohrungen erfolgten zwecks genauerer Ansprache der erbohrten Schichtenfolgen und zum besseren Verständnis des internen Strukturbaus des Salzstockes bohrlochgeophysikalische Untersuchungen. Neben dem Temperatur-Log, dem Bohrlochgeometrie-Log sowie dem Kaliber-Log kamen folgende Untersuchungsverfahren zum Einsatz (Abb. 15):

- Density-Log,
- Gamma-Ray-Log,
- sowie in einigen Bohrungen: Neutron-Log, Sonic-Log, Salinitätsmessungen und Hochfrequenz-Reflexions- und Absorptionsmessungen.

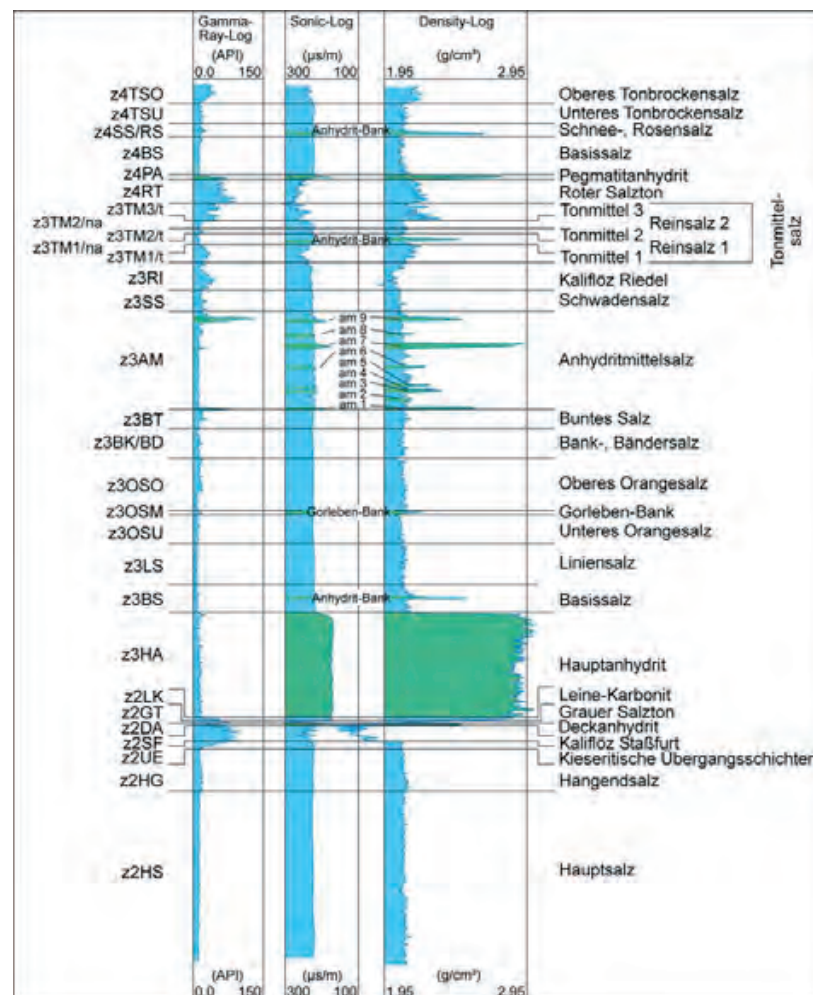


Abb. 15: Synthetische Messkurven für bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Gamma-, Sonic- und Density-Logs) im Bereich der Schichten der Staßfurt-, Leine- und Aller-Folgen in tiefen Erkundungsbohrungen am Standort Gorleben

Insgesamt erfolgten in den Bohrungen 549 geoelektrische Tiefensondierungen zur Charakterisierung der Lagerungsverhältnisse der Sedimente im Nahfeld der Bohrungen und zum Nachweis von Versalzungsbereichen (in den hydrogeologischen Bohrungen). Zur besseren Bestimmung der Lage und Form der Salzstockflanken sowie zur Erfassung der Salzstocküberhänge und der Zechsteinbasis wurden in einigen Bohrungen seismische Untersuchungen (Geophon-Versenkmessungen) zur Bestimmung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen dienten zur Ergänzung bzw. besseren Auswertung der oberflächlich durchgeführten seismischen Untersuchungen.

Das hydrogeologische Untersuchungsprogramm umfasste 322, zwischen 10 und 275 m tiefe Bohrungen. Die hydrogeologischen Bohrungen dienten neben der Analyse des Deck- und Nebengebirges vor allem zur Einrichtung eines Grundwassermessstellennetzes zur Beweissicherung und kontinuierlichen Überwachung (Monitoring) der Grund- und Oberflächenwässer sowie zur Durchführung von Pumpversuchen und Packertests (KLINGE et al. 2007). Im Ergebnis dieser Arbeiten war es möglich, die räumliche Verteilung der grundwasserführenden bzw. -hemmenden Schichten und ihre gegenseitige Vernetzung zu rekonstruieren, zeitlich-räumliche Veränderungen im Grundwasserchemismus zu analysieren sowie die Grundwasserfließrichtungen bzw. -fließgeschwindigkeiten zu bestimmen. Außerdem wurden an den, das Untersuchungsgebiet entwässernden Vorflutern fünf Dauermessstellen errichtet. Zusätzlich wurde zur Untersuchung der lokalen Erdbebentätigkeit ein seismisches Messnetz, bestehend aus ursprünglich sechs, jetzt fünf Stationen, eingerichtet, das seit Februar 1986 betrieben wird.

Die Ergebnisse des übertägigen Untersuchungsprogramms wurden 1983 durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und speziell für das Salinar von BORNEMANN et al. (2008) zusammengefasst. Diese Daten bildeten die Grundlage für die Zustimmung der Bundesregierung zum Beginn der untertägigen Erkundung des Standortes per Kabinettsbeschluss vom 13.07.1983.

3.1.4 Übertägige Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Tonen/ Tonsteinen

Die übertägige geologische Erkundung von potenziellen HAW-Endlagerstandorten in tonigen Gesteinen muss alle, für die Anwendung der Auswahlkriterien bzw. für die Bewertung der Eignungshöflichkeit des Standortes benötigten Informationen liefern. Dazu zählen vor allem Angaben zur Tiefe, Verbreitung und Mächtigkeit der Wirtsgesteinsformation sowie zu den struktur- und hydrogeologischen Standortrandbedingungen. Gleichzeitig müssen im Ergebnis der Erkundungsarbeiten präzise Kenntnisse zu den nachfolgend genannten Themenkomplexen vorliegen, um eine Bewertung auf der Basis standortbezogener

Langzeitsicherheitsanalysen vornehmen sowie die Optimierung des Endlagerkonzeptes vorantreiben zu können:

- Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine (z. B. Einfallen, Verfaltung, Mächtigkeitsschwankungen, tektonische Störungen, räumliche Orientierung von Kluft- und Störungssystemen),
- Lithologie der Gesteinsformation (z. B. Heterogenität, Vorkommen von Sandlinsen, Diagenese- bzw. Metamorphosegrad, Porosität, Begrenzung eines potenziell geeigneten Homogenbereiches),
- mineralogisch-geochemische Zusammensetzung der tonigen Gesteine (z. B. Tonmineralbestand, C_{org} -, Karbonat- und Wassergehalte),
- Sorptions-, hydraulische, geomechanische und thermische Eigenschaften der Wirtsgesteine sowie
- Aufbau und Eigenschaften des Deckgebirges (z. B. Existenz von Quartärrinnen, Vorkommen von mächtigen Störungszonen, Hinweise auf tief eingeschnittene Flusserosion, Durchlässigkeiten und hydraulische Potenziale in den Aquiferen und Aquitarden, Hydrochemie der Tiefengrundwässer und Porenwässer).

Die Notwendigkeit einer detaillierten Erfassung der Bildungsbedingungen bzw. des Verfestigungs- bzw. Diagenesegrades und der mineralogischen Zusammensetzung der Tongesteine ergibt sich aus dem großen Einfluss dieser Faktoren auf die petrophysikalischen Parameter und die Barriereigenschaften dieses Gesteinstyps. Gering verfestigte oder diagenetisch bzw. tektonisch nur schwach überprägte Tonsteine weisen meist höhere Porositäten und Porenwassergehalte sowie ungünstige felsmechanische Eigenschaften auf, die den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle erschweren und spezielle technische/geotechnische Barrieren erforderlich machen (siehe belgisches Endlagerkonzept im Boom-Clay).

Die meisten der in Europa für die HAW-Endlagerung in Frage kommenden Ton/Tonsteinformationen sind marine Sedimente mit einer an Beckenstrukturen gebundenen Verbreitung und häufigen lithofaziellen Wechseln in vertikaler, aber vor allem in lateraler Richtung. Infolge lokal verschiedener Ablagerungsbedingungen und unterschiedlicher Liefergebiete sowie durch Absenkungen bzw. Anhebungen einzelner geologischer Blöcke entlang von Störungszonen weisen viele Tonformationen fazielle, lithologische Wechsel in der Zusammensetzung sowie deutliche Schwankungen in ihren Mächtigkeiten auf. Aufgrund der daraus resultierenden Heterogenität besitzen nur wenige Tonformationen die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften, die von einer geologischen Barriere für ein HAW-Endlager verlangt werden.

Im Ergebnis der übertägigen geologischen Erkundungsarbeiten müssen deshalb insbesondere die heterogenen, geringmächtigen Randfaziesgebiete sowie Bereiche mit häufigen Sandstein-, Karbonat- oder Konglomerateinschaltungen in den tonigen Sedimenten ausgewiesen werden. Der Ausschluss dieser Gebiete ist für die Gewährleistung der für die Langzeitsicherheit erforderlichen Barriereigenschaften der tonigen Wirtsgesteine (z. B. Gebirgsdurchlässigkeit) unbedingt erforderlich. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die Standorterkundung, da die Verbreitung derartiger Gebiete oft nur schwer geophysikalisch oder durch zahlreiche Erkundungsbohrungen mit umfangreichen bohrlochgeophysikalischen Messungen nachweisbar ist.

Tonige Gesteine können aufgrund von Unterschieden in ihrer Versenkungsgeschichte (mit variierender Mächtigkeit der Auflast) deutlich verschiedene Temperaturbelastungen erfahren haben. Dies kann sich entscheidend auf die hydraulischen (z. B. Zunahme der Durchlässigkeit durch Schieferung, Abb. 16), physikochemischen (z. B. Erhöhung der Diffusionskonstanten und Senkung des Sorptionsvermögens) und felsmechanischen (z. B. Abnahme der Festigkeitswerte, unregelmäßige Spannungsverteilungen) Eigenschaften der Tonformationen auswirken (siehe HAMMER et al. 2009). Zwecks Berücksichtigung dieser Faktoren bei der Standortfestlegung und bei der Entwicklung des Endlagerkonzeptes muss die übertägige Erkundung zuverlässige standortbezogene Daten liefern.

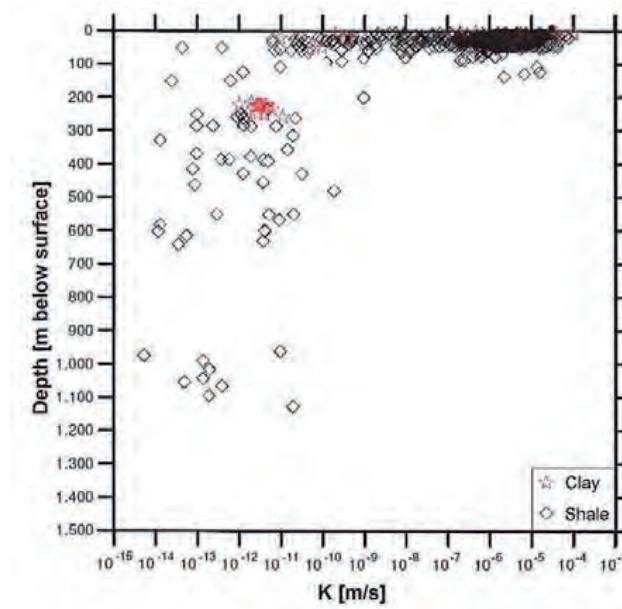


Abb. 16: Variationen der hydraulischen Durchlässigkeiten von Tonen/Tonsteinen in Abhängigkeit von ihrer Versenkungstiefe (OECD 2009)

Ausgehend von diesen Besonderheiten toniger Gesteine hat die übertägige Erkundung von Tonstandorten die Aufgabe, Gebiete mit folgenden Eigenschaften auszuweisen und aus dem weiteren Auswahlverfahren auszuschließen:

- intensiv metamorph überprägte tonige Gesteine (Tonschiefer),
- mächtige Störungszonen in der Nähe des geplanten Endlagerstandortes,
- Bereiche mit intensiv geklüftetem Wirtsgestein,
- Gesteine mit einer hohen Anisotropie in der Zusammensetzung und den hydraulischen und geomechanischen Eigenschaften,
- Gesteine mit hohen C_{org} -, Karbonat- und Wassergehalten,
- Tonformationen mit hohen Siderit- oder Pyrit-Gehalten, da ihre Umwandlung beim Zutritt von Grundwasser zu deutlichen Auswirkungen auf das geochemische Milieu führt (z. B. führt die Zersetzung von Sulfiden zur Schwefelsäurebildung),
- Bereiche mit niedrigen Gehalten von Tonmineralen mit hohem Sorptionsvermögen (Montmorillonit anstelle von Illit oder Sericit),
- Gebiete mit erhöhtem geothermischem Gradienten. Tonige Gesteine sind aufgrund ihrer mineralogischen Zusammensetzung und vergleichsweise hoher Wassergehalte thermisch deutlich weniger belastbar als Steinsalz oder kristalline Gesteine. Dies erfordert zwecks stärkerer Abkühlung der radioaktiven Abfälle längere Zwischenlagerzeiten und größere Abstände zwischen den eingelagerten Abfallcontainern, d. h. größere Endlagerflächen. Um die Temperaturspanne zwischen der maximal möglichen Temperaturbelastung der tonigen Wirtsgesteine und den Temperaturen der eingelagerten Abfallbehälter möglichst groß zu halten, muss die sich aus dem geothermischen Tiefengradienten ergebende Umgebungstemperatur möglichst gering sein.
- Vorkommen mit magmatischen Gängen sowie
- Gebiete mit steil einfallenden Tonschichten.

Aufgrund ihrer genetisch bedingten, oft heterogenen Zusammensetzung sowie infolge lokaler Schwankungen im Diagenese- bzw. Metamorphosegrad und der sich daraus möglicherweise ergebenden großen Variabilität der Eigenschaften sind tonige Gesteine häufig schlecht prognostizierbar bzw. explorierbar. Für die Standorterkundung und für die Ausweisung von geeigneten Einlagerungsfeldern innerhalb der Tonsteinvorkommen sind deshalb häufig erhöhte Aufwendungen erforderlich.

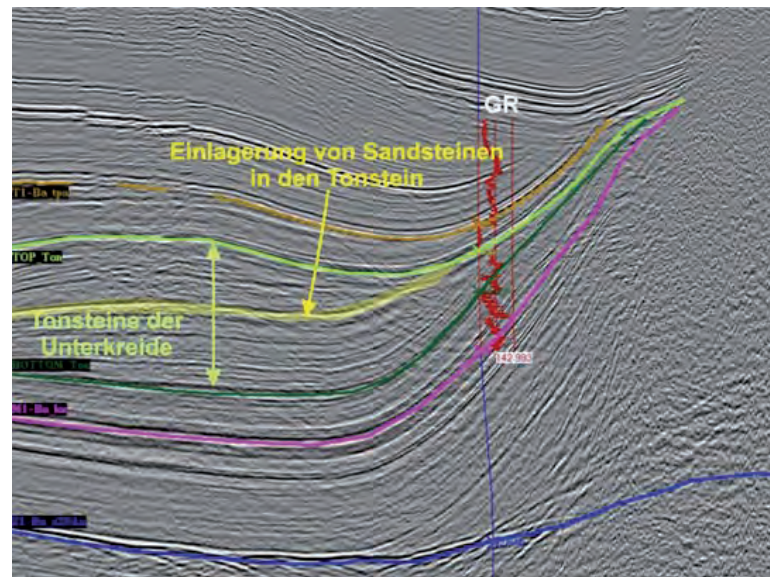


Abb. 17: Beispiel für die Anwendung seismischer Untersuchungen bei der Abgrenzung toniger Schichtpakete und beim Nachweis von mächtigen Sandsteineinlagerungen in Tonkomplexen (Quelle: BGR)

Zur Charakterisierung der Lagerungsverhältnisse und der Ausdehnung der tonigen Schichten sowie des Nebengebietes und der über- bzw. unterlagernden Gesteine werden übertägige geophysikalische Untersuchungen sowie umfangreiche Bohrprogramme realisiert. Bei der Erkundung von Tonstandorten werden zunächst 2D-seismische Messungen durchgeführt, die dann in ausgewählten Bereichen z. B. zum Nachweis randlicher Störungszonen durch 3D-seismische Verfahren ergänzt werden. Die meist deutlichen Impedanzkontraste innerhalb von Sedimentgesteinsabfolgen ermöglichen i.d.R. mittels 2D-Seismik eine eindeutige Bestimmung der Lage der Ober- und Untergrenzen der Tonformationen und eine Rekonstruktion der geologischen Strukturen im Umfeld des Endlagerstandortes, inklusive Nachweis von Störungszonen (Abb. 17). Bei komplizierten, intensiv tektonisch gestörten Lagerungsverhältnissen oder schwierigen lithostratigraphischen Bedingungen kommen 3D-Seismik-Verfahren zur Anwendung. Außerdem ermöglicht der Einsatz der 3D-Seismik eine genauere Bestimmung der Versätze entlang von Störungszonen.

Die oberflächlich durchgeführten seismischen Untersuchungen gestatten aufgrund der zu geringen Unterschiede in den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten meist nur eingeschränkte Aussagen zur Zusammensetzung der tonigen Gesteine (HOTH et al. 2007). Für die Gewinnung diesbezüglicher Informationen, ergänzt um Angaben zur Homogenität der Tonsedimente sowie zum Vorkommen und zu den Eigenschaften von Aquiferen in ihrem Umfeld, werden geologische Erkundungsbohrungen und bohrlochgeophysikalische Messungen eingesetzt. Die Tiefbohrungen dienen einerseits zur Korrelation der Daten aus oberflächlich durchgeführten seismischen Messungen mit den in den Bohrungen angetroffenen geologischen Schichten. Andererseits werden die Bohrkerne und die Bohrlogs dazu benutzt, um die tonigen Schichten genauer stofflich-strukturell charakterisieren zu können.

Die in den Bohrungen durchgeführten geophysikalischen Messungen bilden aufgrund der häufig schwierigen lithologischen Unterscheidung einzelner Schichten und meist fehlender paläontologischer Befunde oft die einzige zuverlässige Grundlage für die Korrelation der Bohrungen untereinander (Abb. 18). In Analogie zu den anderen Wirtsgesteinstypen dient das Kernmaterial der Erkundungsbohrungen für Untersuchungen der Zusammensetzung und der Eigenschaften der Gesteine. Eine Besonderheit bei der Analyse der tonigen Gesteine besteht darin, dass Laboruntersuchungen zur Rekonstruktion der Versenkungs- bzw. Temperaturgeschichte der Gesteine einen breiten Raum einnehmen. Dafür werden z. B. Messungen der Vitrinitreflexion und des Reifegrades der organischen Substanzen sowie Analysen der Apatitspaltspuren durchgeführt. Zur Untersuchung der hydrogeologischen Verhältnisse im Umfeld des geplanten Endlagers wird meist ein spezielles Bohr- und Untersuchungsprogramm realisiert (siehe Kap. 3.1.5).

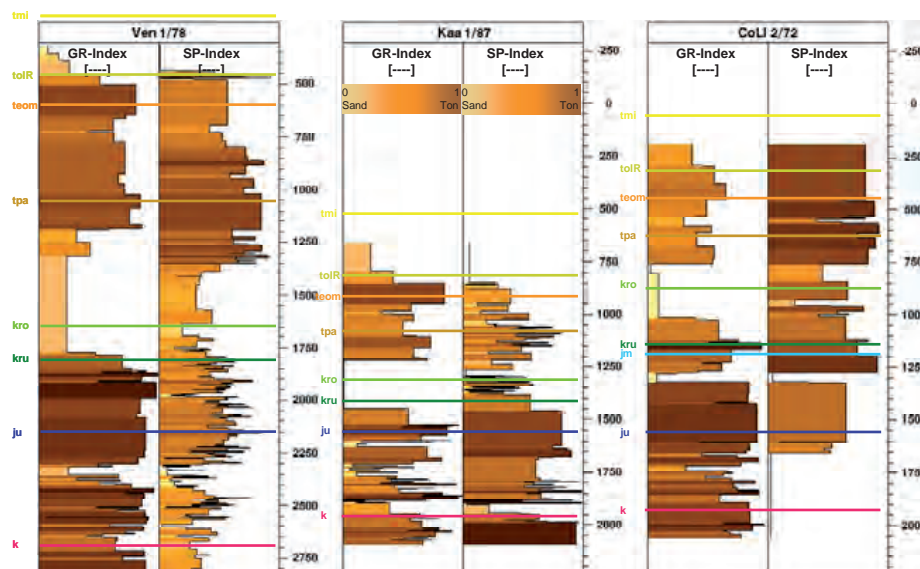


Abb. 18: Abschätzung der Tongehalte in drei, miteinander zu korrelierenden Erkundungsbohrungen auf der Grundlage von Gamma- und SP-Logs (HOTH et al. 2007)

Einen zentralen Platz nehmen bei der übertägigen Erkundung von Tonstandorten die geophysikalischen Messungen in den von übertage ausgeführten Erkundungsbohrungen ein. Sie dienen vor allem zur besseren Korrelation der Bohrungen und zur stofflich-strukturellen Charakterisierung bzw. zum Nachweis der für den Endlagerbau erforderlichen Homogenität der Tongesteine (Abb. 19). Die am häufigsten bei der Untersuchung von Tonformationen eingesetzten geophysikalischen Bohrlochmessverfahren sind:

- aktive elektrische und elektromagnetische Verfahren (Widerstandsmessungen, induktive Messverfahren) zur Bestimmung der Lithologie, Leitfähigkeit und Porosität,

- Eigenpotenzialmessungen zum Nachweis von Sandeinlagerungen in den Tonen,
- Gamma-Spektrometrie zur Analyse der Tonmineralgehalte (Abb. 20),
- Gamma-Gamma-Dichtemessungen für lithologische Aussagen,
- Neutron-Messungen für Schlussfolgerungen zur Lithologie und Porosität,
- akustische Messverfahren, wie Akustik-Log bzw. Sonic-Log oder akustisches Bohrlochfernsehen zur Bestimmung der Porosität, Klüftigkeit und der mechanischen Gesteinseigenschaften. Der Sonic-Log gestattet bei geringer lithologischer Variabilität auch eine Bestimmung des Kompaktionsgrades von Tongesteinen (größere Tiefen führen zu einer Abnahme der Porosität und damit zu einer Zunahme der seismischen Geschwindigkeiten).
- VSP-Messungen zur Interpretation der oberflächlich durchgeführten seismischen Messungen sowie
- Kaliber-Log, Temperatur-Log, Salinitäts-Log und Neigungs- bzw. Bohrlochabweichungsmessungen.

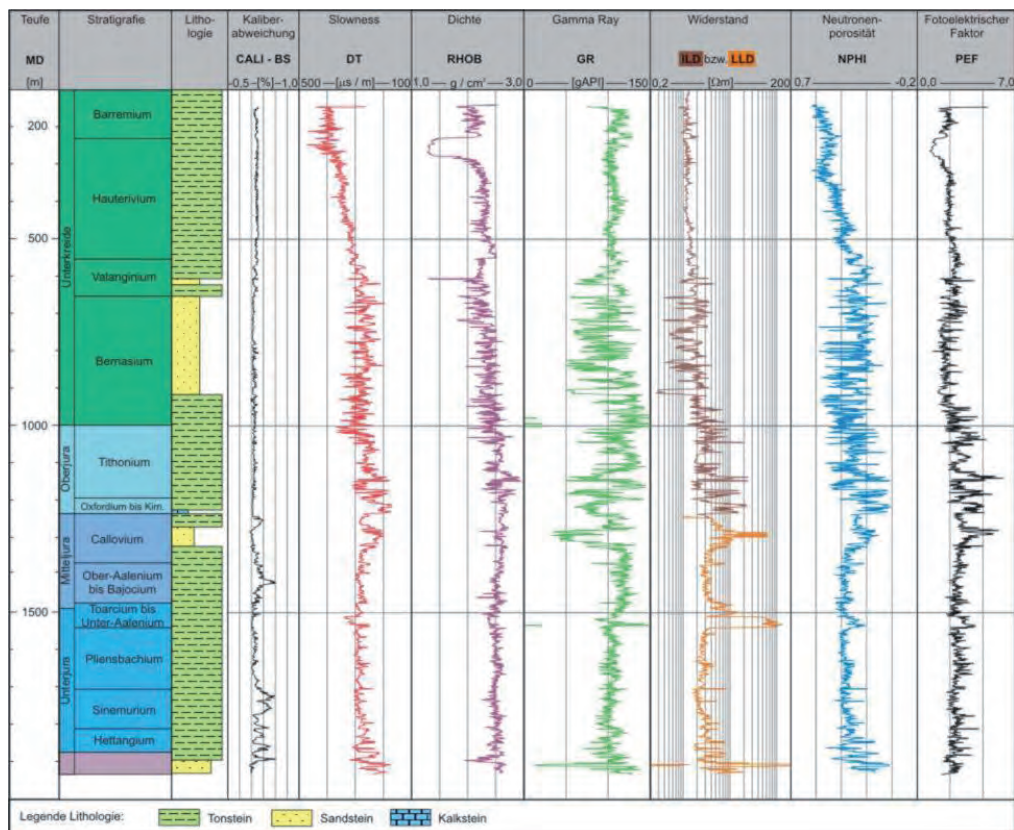


Abb. 19: Beispiel für komplexe geophysikalische Untersuchungen in einer Erkundungsbohrung mit mächtigen Tonschichten, nahe Hannover-Wietze (HOTTH et al. 2007)

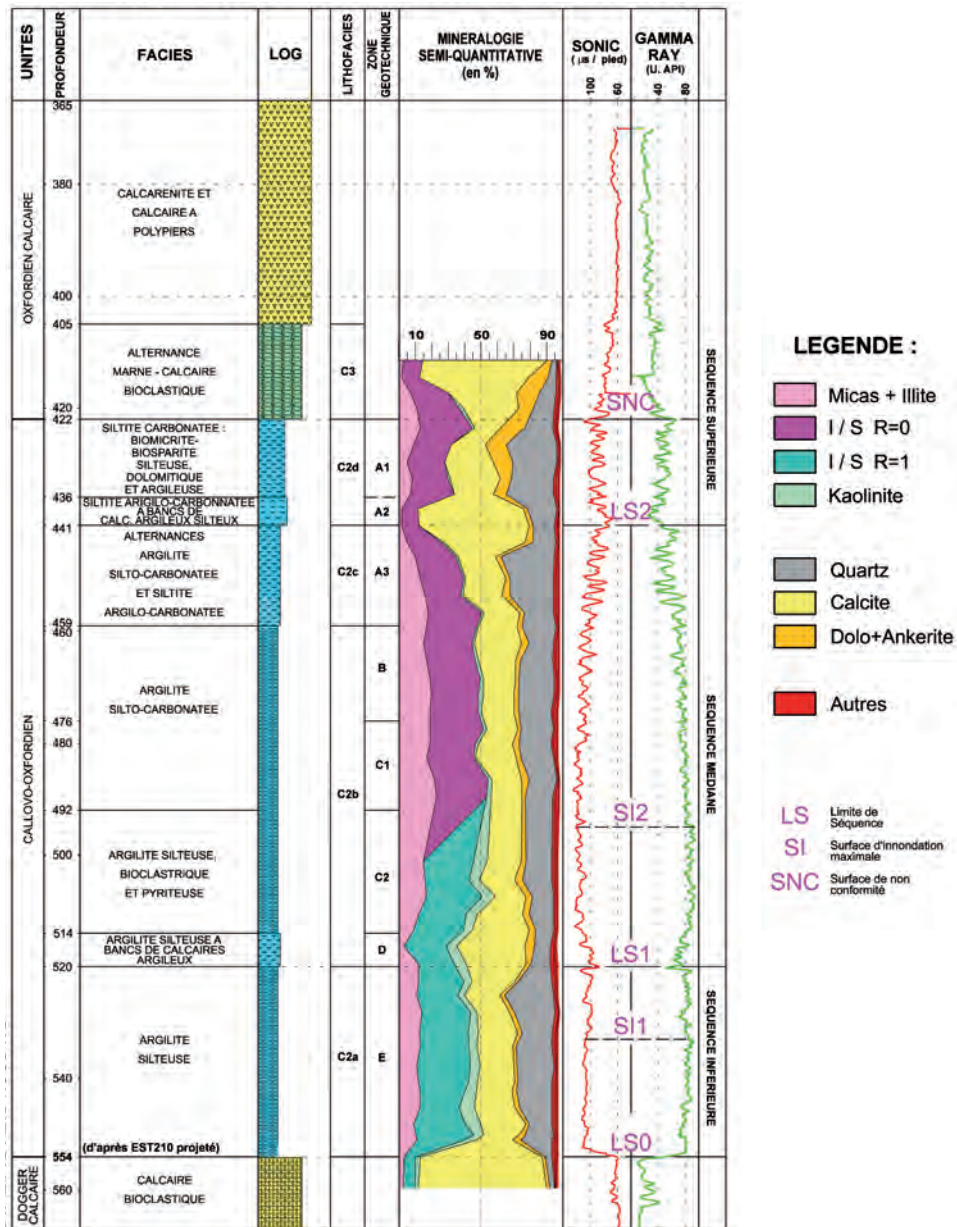


Abb. 20: Nutzung von bohrlochgeophysikalischen Messungen (Sonic-Log und Gamma-Log) zur lithologischen Ansprache und Differenzierung toniger Wirtsgesteinsformationen (ANDRA 2005b)

Nur in wenigen Fällen werden in den Bohrungen zusätzlich geomagnetische Messungen, Bestimmungen des photoelektrischen Faktors zur Ermittlung der Quarz- und Karbonatgehalte sowie Abschätzungen der Gehalte von freiem Wasser mittels Nuclear Magnetic Resonance (NMR) durchgeführt. Häufig gestattet die gemeinsame Auswertung mehrerer Logs eindeutigere Aussagen zu den Eigenschaften der Gesteine. So z. B. stützen sich Bestimmungen der Porosität idealerweise auf die komplexe Interpretation der Ergebnisse von Akustik-, Dichte- und Neutronmessungen (HOTH et al. 2007).

Ebenfalls in den Erkundungsbohrungen werden mittels „Formation Micro Imager“ und Kalibermessungen oder durch Hydraulic fracturing bzw. Packerabdrücktests die In-situ-Spannungen bzw. die Lage der Hauptspannungsrichtungen in den tonigen Schichten bestimmt (Abb. 21). Für Aussagen zu den hydrogeologischen Eigenschaften der Gesteine werden in den Erkundungsbohrungen Impeller-Flowmeter- oder Heat-Pulse-Flowmeter-Messungen durchgeführt.

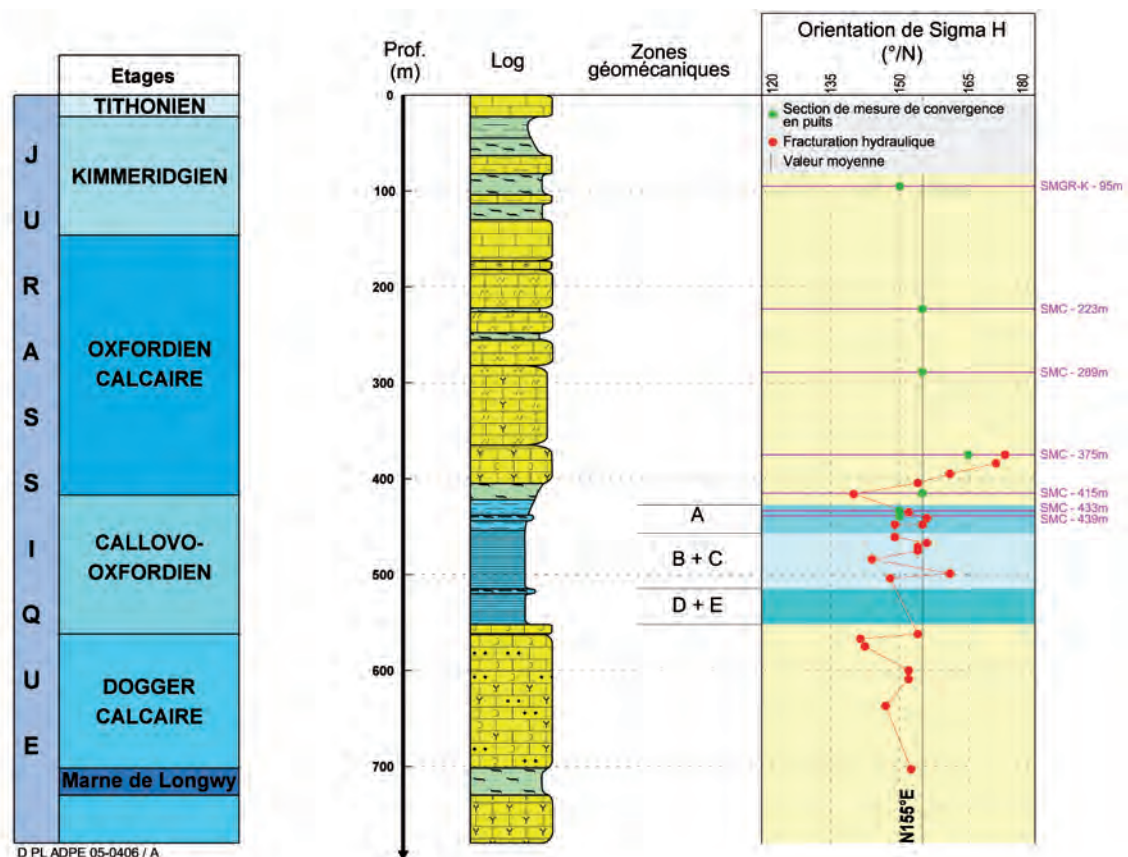


Abb. 21: In einer Erkundungsbohrung nahe Bure gemessene Veränderungen der Orientierung der Hauptspannungsvektoren im Bereich der in Frankreich für die HAW-Endlagerung vorgesehenen jurassischen Tonsedimente (ANDRA 2005b)

Im Rahmen der Standortcharakterisierung sind außerdem hydrogeochemische Untersuchungen der Tiefen- und Porenwässer zur Bestimmung solcher Kennwerte wie Alter, Verweilzeit, Fließgeschwindigkeit und chemische Zusammensetzung von großer Bedeutung. Ergänzend erfolgen zur Bestimmung der Diffusionseigenschaften hydraulische In-situ-Versuche mit Langzeitpackertests sowie Langzeittracertests mit synthetischem Porenwasser, das speziell den Verhältnissen im Tonstein angepasst ist. Ähnlich wie bei anderen Wirtsgesteinstypen werden an Tonstandorten geodätische Messungen, Satelliten- oder Flugzeug-gestützte Höhenmessungen sowie geomorphologische Untersuchungen zur Abschätzung bzw. zum Nachweis von Hebungs- bzw. Absenkungsprozessen vorgenommen (siehe Kap. 3.1.1).

3.1.5 Beispiele für übertägige Standorterkundungen in tonigen Gesteinsformationenen

Frankreich

In Frankreich wurde die am Ostrand des Pariser Beckens gelegene Region Meuse/Haute Marne 1998 als potenziell geeignetes Gebiet für den Bau eines HAW-Endlagers in tonigen Gesteinen ausgewählt (Abb. 22). Die Standortregion wurde aus politischen Gründen auf die Grenze der Departements Meuse und Haute Marne gelegt (ausführlicher siehe HAMMER et al. 2009). Als potenzielle Wirtsgesteine sollen jurassische Tongesteine dienen, die in dieser, mit mächtigen mesozoischen Sedimenten gefüllten Beckenstruktur in einer Tiefe von 400 bis 600 m liegen. Die in einer Kalk-Mergel-Tonstein-Folge vorkommenden Tonsteine des Callovo-Oxfordian sind im Bereich des Untertagelabors Bure etwa 130 m mächtig.

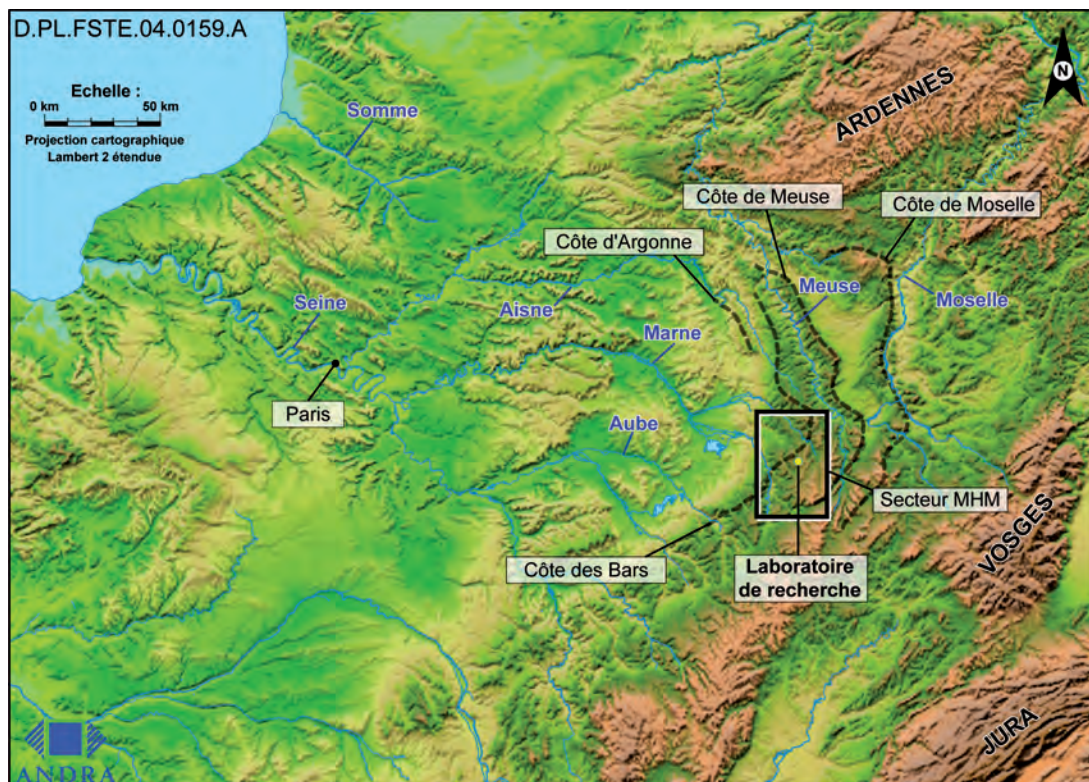


Abb. 22: Lage der potenziellen Endlagerregion Meuse/Haute Marne am Ostrand des Pariser Beckens (ANDRA 2005b)

Nach der Auswertung der zur Untersuchungsregion Meuse/Haute Marne vorliegenden Altunterlagen (geologische Karten, 68 Ölbohrungen und 1300 km seismische Profile) wurde zunächst ein Erkundungsbereich festgelegt. In dieser Region wird sich der zukünftige Endlagerstandort befinden, der auf der Grundlage der übertägigen Erkundungsergebnisse und der Daten aus dem seit 2000 errichteten URL Bure ausgewählt wird. Das etwa 30 x 50 km große Gebiet wurde bereits im Rahmen der Standortfindung zwischen 1994 und 1996 parallel zur Region Gard mit 3 Erkundungsbohrungen, übertägigen Kartierungen und 2D-seismischen Untersuchungen erkundet.

Um die Kenntnisse zur Standortregion und zum Wirtsgestein zu verdichten bzw. zu vertiefen, erfolgte nach der Entscheidung für die Region Meuse/Haute Marne eine Fortsetzung der Erkundungsarbeiten. Die dafür Ende 1998 per Gesetz vorgeschriebenen Untersuchungen waren im Zeitraum 1999 bis 2001 auf die Erkundung des geologischen, tektonischen und hydrogeologischen Aufbaus sowie der geomechanischen und geochemischen Eigenschaften des Deckgebirges, des Wirtsgesteins und der Liegendschichten (Dogger) ausgerichtet. Das Untersuchungsprogramm wurde 2002 revidiert und konzentrierte sich danach vorwiegend auf umfangreiche Bohrprogramme. In diesem Rahmen wurden 2003/2004 die übertägigen Bohrprogramme "Forages de Reconnaissance de la Formation (FRF)" und "Forages Scientifiques Profonds (FSP)" realisiert (Abb. 23). Das Untersuchungsprogramm wurde durch 2D und 3D-seismische Messungen sowie das Abteufen der Schächte für das Untertagelabor ergänzt.



Abb. 23: Lage der in der Endlagerregion Bure niedergebrachten Tiefbohrungen und der an der Erdoberfläche gemessenen seismischen Profile (ANDRA 2005c)

Das Bohrprogramm FRF (ANDRA 2004) hatte folgende Zielsetzungen:

- Identifizierung und Charakterisierung der seismischen Diskontinuitäten im Bereich des Doggers,
- Untersuchung der sedimentologischen und petrographischen Bandbreite im Nahfeldbereich des Untertagelabors,
- Verifizierung der physikalischen Gesteinseigenschaften,
- Ermittlung der Gebirgsspannungen im Dogger,

- tektonische Trennflächenanalyse anhand von Bohrkernen,
- geophysikalische Messungen (z. B. Sonic logs, gamma ray) zur genaueren Gesteinscharakterisierung sowie
- Ergänzung der Daten zu den hydrogeologischen Verhältnissen im Callovo-Oxfordian und im Dogger.

Das Programm FSP (ANDRA 2003) hatte folgende Ziele:

- Verbesserung der geologischen und hydrogeologischen Datenbasis sowie Ermittlung der Gebirgsspannungen im Bereich des Deckgebirges (Oxfordian) und des Liegenden (Dogger),
- Erkundung der hydraulischen Wirkung der Störungssysteme im Bereich der Marne und von Poissons (Abb. 24),
- Bestimmung der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Formationswässer,
- lithologische, petrographische und mineralogische Charakterisierung der Gesteine im Untersuchungsgebiet sowie
- Charakterisierung der Ablagerungsbedingungen und der lithologischen Variationen des Wirtsgesteins.

Einige der im Rahmen dieser Programme niedergebrachten Bohrungen wurden im Bereich des Callovo-Oxfordian aus der vertikalen Richtung abgelenkt, um mehr Informationen zum Aufbau der Wirtsgesteinsformation und bessere Voraussetzungen für einen Teil der hydrogeologischen Untersuchungen zu erhalten.

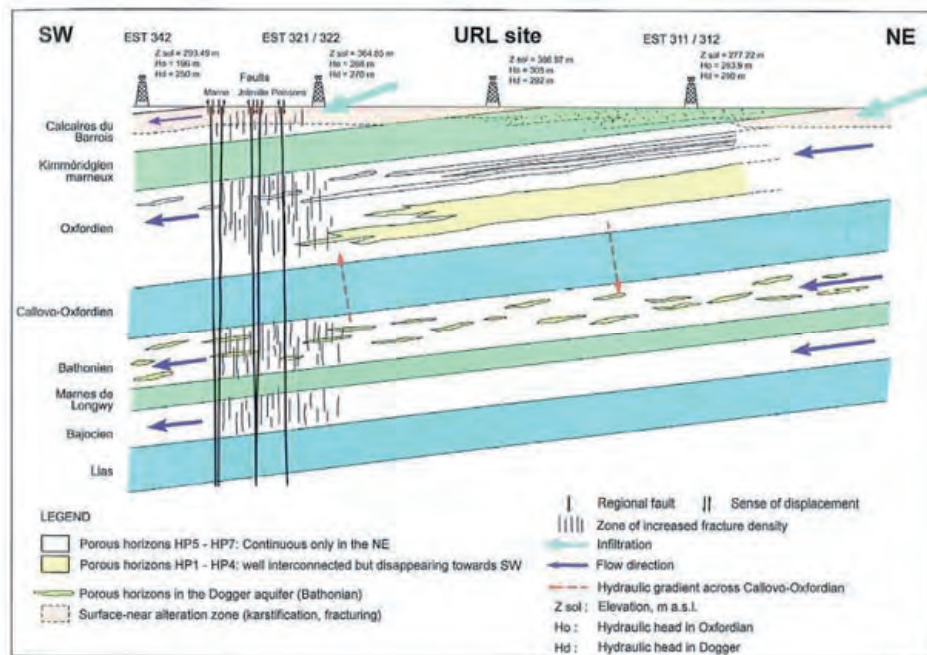


Abb. 24: Schematischer Vertikalschnitt durch die Endlagerregion Bure mit Ausweisung der Störungszonen-Systeme bei Marne und Poissons (OECD 2009)

Im Rahmen des Bohrprogramms FSP wurden umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt. Sie hatten das Ziel, die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse und die Aquifere des Untersuchungsgebietes genauer zu charakterisieren. Dies beinhaltet ihre vertikale und horizontale Variabilität, die hydraulische Charakterisierung der einzelnen Schichten sowie die geochemischen Eigenschaften der Porenwässer und ihre Wechselwirkungen mit den Gesteinen. In den Bohrungen wurden mit Standardverfahren Kurzzeit- und Langzeitpackertests durchgeführt, um die hydraulischen Eigenschaften des Deckgebirges, des Wirtsgesteins im potenziellen Einlagerungsbereich und der unterlagernden Schichten zu untersuchen. Außerdem kamen Pulstests und Multipacker Recovery Tests zur Anwendung. Die In-situ-Messungen wurden durch Laboruntersuchungen an den Bohrkernen zur Durchlässigkeit der Gesteine und zu ihrer Porosität ergänzt.

Komplettiert wurden die hydrogeologischen Untersuchungen durch Langzeittests (Electromagnetic pressure tests, EPG) mit festinstallierten, permanenten Packersystemen, um den Formationsdruck zu messen (Abb. 25). Diese Tests wurden später durch hydraulische Versuche in den Schächten bzw. in vom Schacht aus gestoßenen Bohrungen ergänzt. In den Tiefbohrungen im Umfeld des URL erfolgten außerdem Hydrofrac-Messungen zur Ermittlung der Gebirgsspannungen und ihrer Orientierungen. Hinweise zu den Spannungsrichtungen lieferte auch die Auswertung der tektonischen Trennflächen in den Bohrkernen. Zusätzlich wurden in-situ im Bereich der Versuchsstrecken Überbohrversuche ausgeführt.

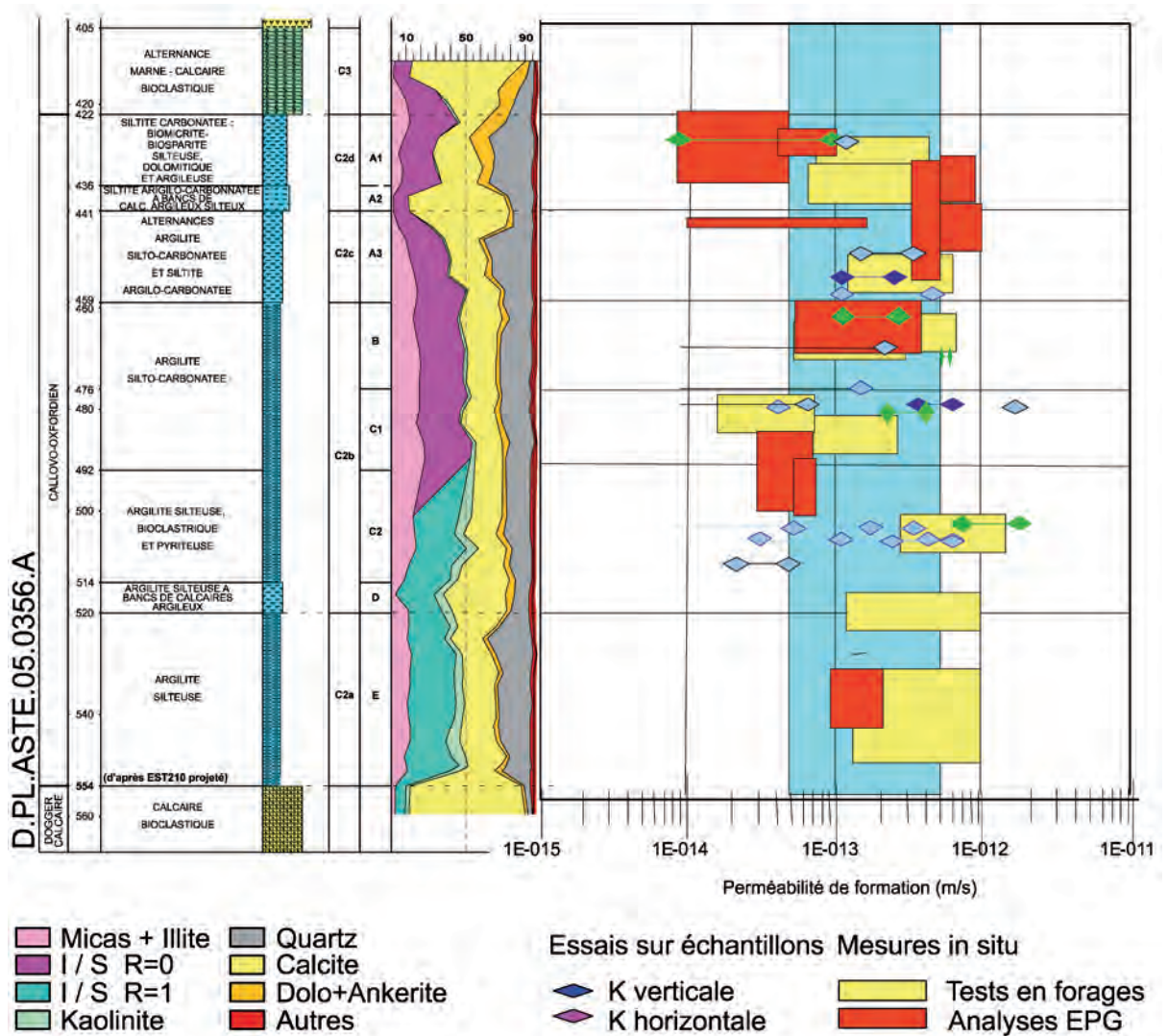


Abb. 25: Ergebnisse hydrogeologischer Untersuchungen in einer Erkundungsbohrung im Umfeld des URL Bure, inklusive EPG-Messergebnisse (ANDRA 2005b)

In einer relativ frühen Phase des Standorterkundungsprogrammes erfolgte im Bereich der 1998 ausgewählten Endlagerregion die Festlegung des Standortes für das Untertagelabor Meuse/Haute Marne nahe dem Dorf Bure. Die Arbeiten im URL sind vor allem auf die standortbezogene Untersuchung der Barriere- und felsmechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteine sowie auf die Entwicklung und Erprobung des Einlagerungskonzeptes ausgerichtet. Mit dem Abteufen der beiden, jeweils ca. 500 m tiefen und etwa 100 m voneinander entfernten Schächte für das URL wurde im Sommer 2000 begonnen, die Fertigstellung der Schächte erfolgte Ende 2005. Bei positiver Eignungsaussage für die durch überträgige Erkundungsarbeiten und im URL untersuchten Tonschichten wird das HAW-Endlager voraussichtlich an einem anderen, aber naheliegenden Standort errichtet. Damit werden für das HAW-Endlager mögliche Schädigungen der geologischen Barriere durch die überträgigen Erkundungsarbeiten und die Versuche im URL ausgeschlossen.

Ergänzend zu den bisher dargestellten Erkundungsarbeiten wurden bis 2007 in der Standortregion 27 Erkundungsbohrungen mit einer Gesamtlänge von ca. 15 km von der Erdoberfläche aus gestoßen. Es liegen 4,5 km Kerne vor, davon ca. 2,5 km aus dem tonigen Endlagerwirtsgestein. Parallel dazu erfolgten 2D-seismische und im Bereich des Untertagelabors 3D-seismische Untersuchungen. Im Rahmen dieser übertägigen Erkundungen wurden die Kenntnisse zu den potenziellen Wirtsgesteinen des Callov-Oxfordian sowie zu den unter- und überlagernden Gesteinsschichten und den Störungszonen, die das Untersuchungsgebiet randlich begrenzen, weiter vertieft. Schwerpunkte der Untersuchungen stellten die Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften der Deckgebirgsschichten und des Wirtsgesteins sowie Untersuchungen der regionalen sowie lokalen Grundwasserbewegungen dar, um mögliche Fließwege, über die radioaktive Elemente in die Biosphäre gelangen könnten, zu identifizieren. Außerdem dienten die Untersuchungen zur besseren Charakterisierung der Barriereigenschaften der tonigen Wirtsgesteine und zum Nachweis, dass im Bereich des geplanten Endlagerniveaus keine hydraulisch aktiven Klüfte und Störungszonen vorkommen. Die niedergebrachten Erkundungsbohrungen und die zusätzlichen seismischen Profilmessungen vertiefen zusammen mit den Erkenntnissen im Verlauf des Schachtabteufens die Datenbasis für das geologische Modell und die Langzeitsicherheitsanalyse (ANDRA 2005e).

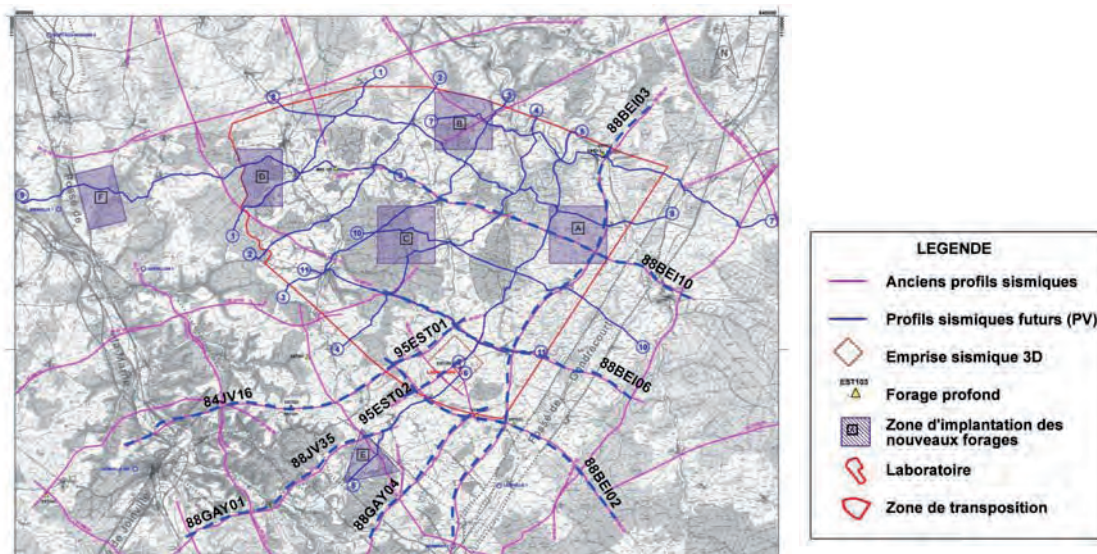


Abb. 26: Lage der zwischen 2007 und 2011 im Umfeld des URL Bure durchzuführenden seismischen Profile und Erkundungsbohrungen (Quelle: ANDRA)

Im Zeitraum von 2007 bis 2009 erfolgt mit einem jährlichen Aufwand von etwa 90 Mio. Euro die Fortführung der Untersuchungen der vorausgewählten Region mit weiteren sechs Tiefbohrungen und 2D-Seismik (Abb. 26). Die Hauptziele der voraussichtlich bis 2011 andauernden Standorterkundungsarbeiten bestehen vor allem in der Erfassung der horizontalen bzw. vertikalen Variabilität (Fazieswechsel) der Gesteine, in ihrer detaillierten stofflich-strukturellen Charakterisierung (Maßstabsverfeinerung) und in der Anpassung

bzw. Verfeinerung der Modellvorstellungen für den Langzeitsicherheitsnachweis sowie in der Auswahl des konkreten Endlagerstandortes. Die seismischen Untersuchungen mit einer geplanten Gesamtpfyllänge von ca. 185 km sollen Angaben zur Homogenität der Tonsteine und zum Vorkommen von Störungszonen liefern. Die Bohrungen dienen zur Vertiefung der Kenntnisse zum Aufbau und zu den Eigenschaften der Wirtsgesteinsformation und des Nebengebirges (Bohrungen A bis D) sowie zum Studium von Störungszonen, die das Untersuchungsgebiet durchschlagen bzw. randlich begrenzen (Bohrungen E und F, siehe Abb. 27).



Abb. 27: Lage der im Untersuchungsgebiet Meuse/Haute Marne geplanten tiefen Erkundungsbohrungen zur Analyse der Wirtsgesteine bzw. des Nebengebirges (Bohrungen A bis D) und der Störungszonen (Bohrungen E und F) (Quelle: ANDRA)

Auf der Grundlage dieser Daten soll 2009 die Abgrenzung eines ca. 30 km² großen Gebietes erfolgen, in dem der zukünftige Endlagerstandort liegen wird, für den augenblicklich von französischer Seite von einem Flächenbedarf von ca. 5 km² ausgegangen wird. Parallel zu den übertägigen geologischen Erkundungsarbeiten werden im Bereich der zukünftigen Endlagerregion im URL Bure die In-situ-Untersuchungen der Zusammensetzung und der Eigenschaften des potenziellen Endlagerwirtsgesteins detailliert fortgesetzt (siehe Kap. 3.2.2.2).

Schweiz

Nach intensiven Untersuchungen unterschiedlicher Wirtsgesteinsoptionen (siehe HAMMER et al. 2009) und unter Berücksichtigung der Erfahrungen anderer Länder (z. B. Belgien, Frankreich und Japan) hat sich die Schweiz 1994 für den Opalinuston in der Nordschweiz als potenzielles HAW-Endlager-Wirtsgestein erster Priorität entschieden. Der etwa 80 bis 120 m mächtige, dem Dogger zugehörige Opalinuston ist ca. 160 - 180 Mio. a alt und relativ homogen zusammengesetzt (Abb. 28). Er weist nur geringfügige laterale und vertikale fazielle bzw. lithologische Schwankungen auf.

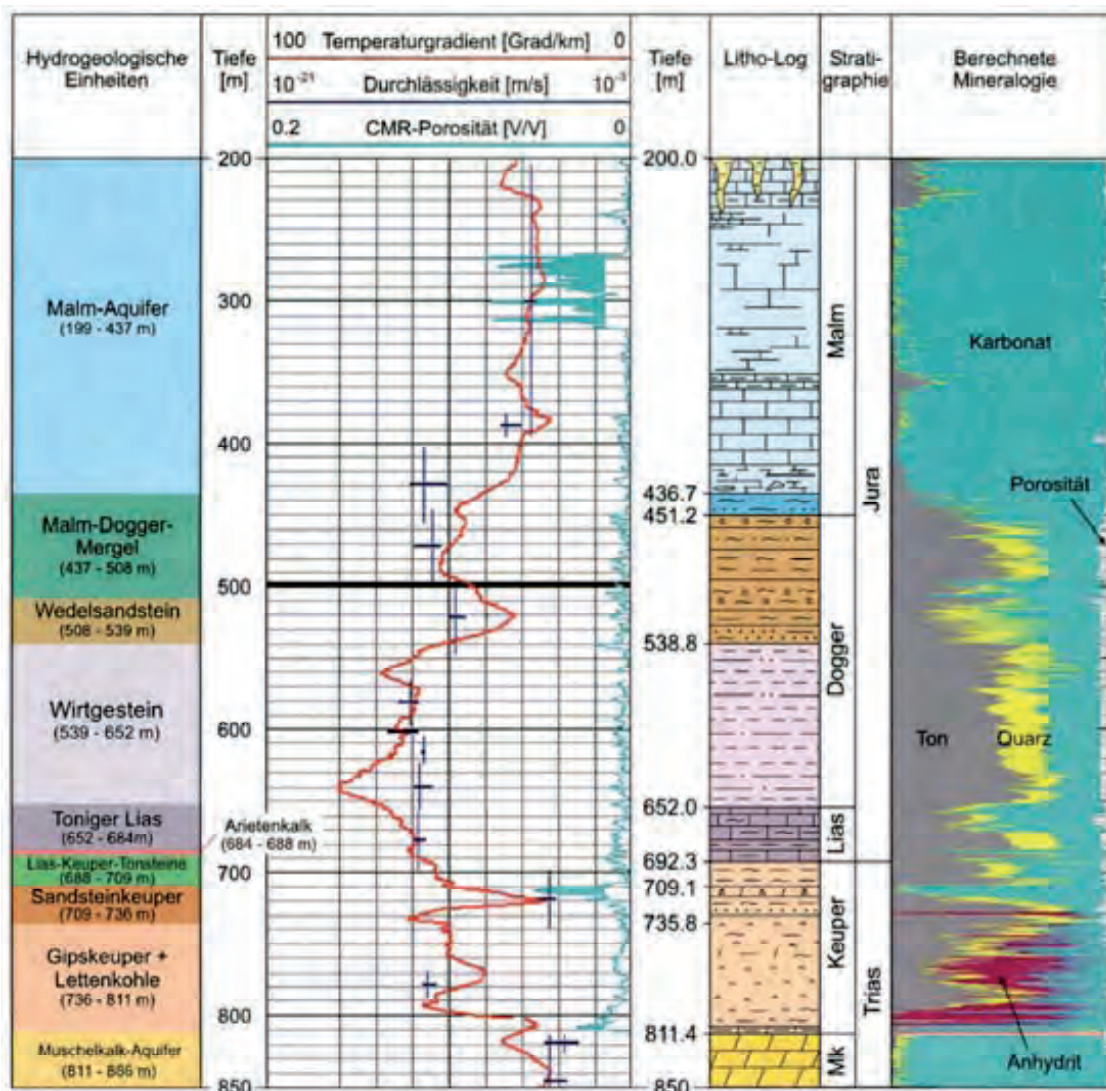


Abb. 28: Zusammensetzung und hydrogeologische Gliederung der Sedimentschichten im Umfeld des Opalinustones im Zürcher Weinland, Schweiz (NAGRA 2002a)

Nach der grundsätzlichen Entscheidung für den Opalinuston erfolgten bis Ende 1995 Auswertungen der bereits vorhandenen geologischen Erkundungsergebnisse für das Verbreitungsgebiet des Opalinustons in der Nordschweiz. Im Mittelpunkt standen dabei die tektonische Gliederung seiner Verbreitungsfläche und die Erfassung der zum potenziellen Wirtsgestein vorliegenden stofflich-strukturellen Informationen. Die Grundlage dafür bildeten die Resultate aus der Reflexionsseismik, aus Tiefbohrungen und aus geologisch-geophysikalischen Arbeiten an der Erdoberfläche (Abb. 29).

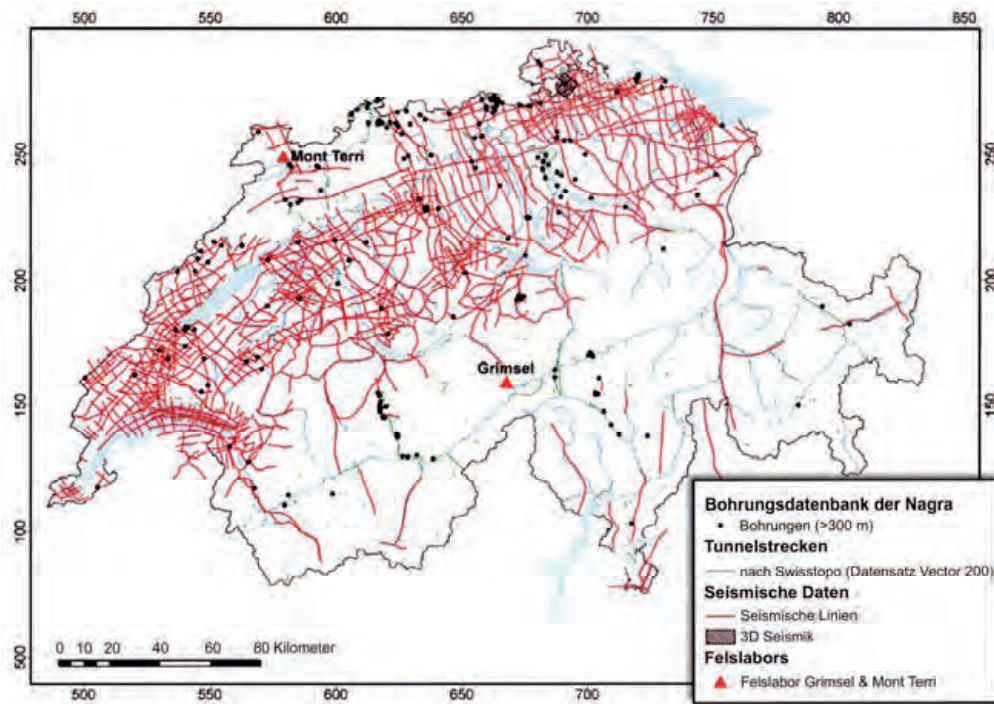
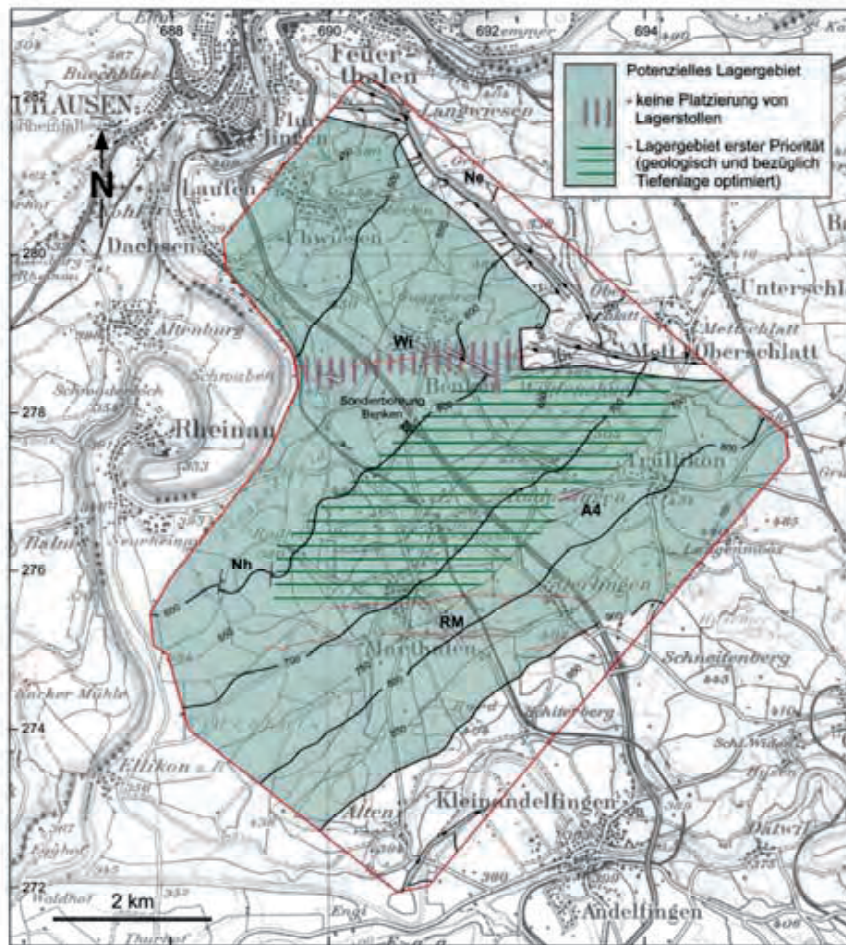


Abb. 29: Verteilung der für das schweizerische Auswahlverfahren für einen HAW-Endlagerstandort zur Verfügung stehenden Daten aus Tiefbohrungen (tiefer 300 m), Seismik und Tunnelbauten (NAGRA 2005)

Im Ergebnis einer komplexen Auswertung der bereits vorliegenden Erkundungsdaten (inklusive spezieller Laboruntersuchungen) wurde unter Berücksichtigung der seit 1996 im Mont Terri-Projekt erzielten Resultate internationaler Forschungsprojekte sowie der Erfahrungen aus dem Eisenbahn- und Straßentunnelbau das Zürcher Weinland als bevorzugte Standortregion ausgewählt. Ab 1998 wurden in diesem Gebiet detaillierte geologische Untersuchungen durchgeführt (NAGRA 2002a, 2002b).



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BA034965)



Abb. 30: Messgebiet für die 3D-Seismik im Zürcher Weinland (NAGRA 2002a)

Die übertägige geologische Erkundung sollte die ausreichende Ausdehnung des Opalinustons im Bereich des potenziellen Standortgebietes im Zürcher Weinland dokumentieren, die geowissenschaftlichen Grundlagen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers in diesen geologischen Schichten liefern und die bautechnische Machbarkeit abklären. Die Schwerpunkte der Arbeiten lagen dementsprechend in einem 3D-seismischen Erkundungsprogramm und im Abteufen der Tiefbohrung Benken bis in eine Endteufe von 1007 m (Abb. 30 und 31). Weitere Untersuchungen der Barriereigenschaften der tonigen Wirtsgesteine wurden im Rahmen internationaler Forschungsprogramme im Felslabor Mont Terri sowie im französischen URL Bure durchgeführt (siehe Kap. 3.2).

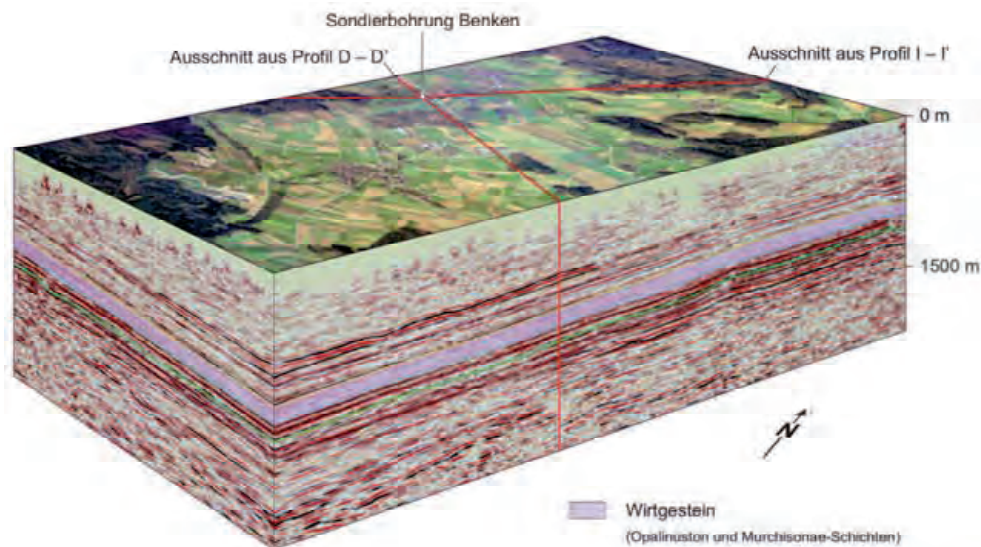


Abb. 31: Ergebnisse der 3D-Seismik im zentralen Gebiet des Zürcher Weinlandes und Lage der Sondierbohrungen Benken (NAGRA 2002a)

Die Hauptzielsetzungen der Sondierbohrung Benken waren:

- Erfassung der Mächtigkeiten, des Schichtenprofils sowie der lithologischen und mineralogisch/petrographischen Ausbildung der erbohrten Sedimentabfolge,
- Bestimmung der Kluft- und Störungssysteme sowie ihrer räumlichen Orientierung,
- Erkundung der felsmechanischen Eigenschaften und Erfassung des Spannungsfeldes und der Temperaturverhältnisse im Opalinuston,
- Erkundung der Transmissivitäten und hydraulischen Potenziale in den Aquiferen und Aquitarden,
- hydrochemische und isotopenhydrogeologische Untersuchungen der Tiefengrundwässer in Aquiferen und der Porenwässer in Aquitarden sowie
- Erhebung von geophysikalischen Referenzdaten für die Kalibrierung der oberflächlich durchgeführten seismischen Untersuchungen.

In der Sondierbohrung Benken erfolgten umfangreiche hydraulische Messungen, die im potenziellen Endlagerniveau horizontale hydraulische Durchlässigkeiten zwischen 10^{-14} und 10^{-13} m/s ergaben (NAGRA 2002a). Lediglich in Oberflächennähe wurden infolge Entlastung und Verwitterung der Sedimente deutlich höhere Durchlässigkeiten (bis 10^{-4} m/s) bestimmt, die aber bereits bei Tiefen unterhalb 30 m nicht mehr beobachtet wurden (stets kleiner als 10^{-11} m/s). Auch die im Opalinuston nachgewiesenen Störungszonen

weisen aufgrund seines Selbstabdichtungsvermögens nur sehr geringe Durchlässigkeiten auf.

Die an Porenwässern aus dem Opalinuston der Bohrung Benken durchgeführten hydrochemischen Untersuchungen ergaben, dass diese Lösungen ein sehr hohes Alter aufweisen und sich seit ihrer Bildung kaum verändert haben. Die Ergebnisse von Labor- und Feldmessungen zeigen außerdem, dass der Opalinuston aufgrund seiner geringen lithologischen Variabilität nur geringfügige Variationen in seinen hydraulischen und felsmechanischen Eigenschaften aufweist. Die in der Bohrung Benken mit Hilfe der Hydrofrac-Methode und der Auswertung von Bohrlochrandausbrüchen sowie induzierter Rissbildung bestimmten Spannungen und ihre Verteilungen liegen im geplanten Einlagerungsbereich zwischen 15 und 20 MPa. Sie lassen sich problemlos mit einem kompressiven Spannungsfeld und in Übereinstimmung mit der tektonischen Situation am Standort erklären (NAGRA 2002a).

Die Ergebnisse der bisher im Rahmen des Endlagerprojektes im Opalinuston realisierten übertägigen Erkundungsarbeiten sind Bestandteil der Machbarkeitsstudie bzw. des vorläufigen Sicherheitsnachweises (NAGRA 2002b).

3.1.6 Übertägige Erkundung von HAW-Endlagerstandorten im Kristallin

Radionuklidfreisetzungen aus HAW-Endlagern in kristallinen Gesteinen sind aufgrund der geringen effektiven Porositäten und niedrigen Permeabilitäten der ungestörten Gesteinsmatrix sowie infolge des Spröbruchverhaltens dieses Gesteinstyps auf advective Prozesse in hydraulisch aktiven Klüften bzw. tektonischen Störungszonen beschränkt. Möglich sind Grundwassermigrationen auch entlang von Gesteinskontakten, wie Einschlüssen, magmatischen Gängen, Kontakten zwischen unterschiedlichen Intrusionsphasen sowie Kontakten zum Nebengestein. Kontaktbereiche von Intrusivkörpern sind i.d.R. stark deformiert und metasomatisch überprägt. Außerdem stellen sie bei Deformations- bzw. Metamorphoseprozessen Schwächezonen dar. Für die Auswahl und Erkundung eines möglichen Endlagerstandortes im Verbreitungsgebiet kristalliner Gesteine ergibt sich daraus die Forderung, diese Bereiche explizit zu suchen, detailliert zu charakterisieren und ggf. als Ausschlussgebiete für den Endlagerbau auszuweisen.

Die Suche nach geeigneten Endlagerstandorten im Kristallin konzentriert sich auf das Auffinden von wenig gestörten Gesteinsbereichen weit entfernt von mächtigen, hydraulisch aktiven, tief reichenden Störungszonen bzw. Grundwassermigrationsbahnen. Endlagerstandorte im Kristallin sollten nur geringe lithologische Inhomogenitäten bzw. Anisotropien in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften der Gesteine aufweisen. Potenzielle Endlagerstandorte liegen in seismisch, vulkanisch und tektonisch lang anhaltend inaktiven Zonen mit einer geringen Grundwasserneubildungsrate und niedrigen

Grundwasserfließgeschwindigkeiten. Für ein Endlager geeignete Gesteinsblöcke zeichnen sich durch einen relativ einfachen Internaufbau, eine geringe stofflich-strukturelle Variationsbreite sowie eine möglichst schwache, weitmaschige Klüftung aus.

Eine häufig komplizierte, anisotrope In-situ-Spannungsverteilung in Kristallingesteinen (siehe HAMMER et al. 2009) setzt im Vorfeld der Standortentscheidung und bei der Projektierung des Endlagerbergwerkes eine genaue Kenntnis der Größe und Orientierung der Spannungsvektoren sowie Informationen zur möglichen räumlich-zeitlichen Entwicklung der Spannungsfelder voraus. Geotektonische Prozesse in benachbarten, mobilen geologischen Einheiten können dazu führen, dass sich die Spannungsverteilungen in den Gesteinen ändern, d. h. Klüfte, die zum Zeitpunkt der Standortauswahl geschlossen bzw. verheilt waren, können aufreißen oder neue Klüfte/Störungen können entstehen. Dies kann deutliche Auswirkungen auf die Grundwasserfließverhältnisse haben. Demzufolge ist die Erkundung eines Kristallin-Standes für die Errichtung eines unterirdischen HAW-Endlagers nicht nur auf die Analyse der aktuellen struktur- und hydrogeologischen Standortrandbedingungen ausgerichtet, sondern auch auf eine Bewertung und Prognose der seismischen und tektonischen Prozesse im Umfeld des Standortes.

Unter Berücksichtigung der genannten Umstände sind die geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten an Standorten in kristallinen Gesteinen vor allem auf die Sammlung von Daten zu folgenden Themenkomplexen ausgerichtet:

- Identifizierung und umfassende Charakterisierung (räumliche Orientierung und Verteilung, Verschneidung sowie Öffnungsgrad und evtl. mineralogische Füllung) von Störungszonen bzw. potenziellen Grundwasserfließwegen im Nah- und Fernfeld des Endlagers,
- Vorkommen und hydraulische Eigenschaften von Poren- (im Deck- und Nebengebirge) und Kluftgrundwasserleitern, hydrogeologische Zonierung des geologischen Untergrundes,
- Physikochemie und Alter der Grundwässer, insbesondere im geplanten Endlagerniveau,
- Spannungsverteilungen und wahrscheinliche Deformationsraten in den Gesteinen bis in den geplanten Einlagerungsbereich,
- Anisotropien in der Zusammensetzung und in den gebirgsmechanischen, thermischen und geochemischen Eigenschaften der Gesteine,
- durch präzise seismologische Beobachtungen, geomorphologische Analysen bzw. geodätische Messungen gestützte Angaben zu den seismischen und neotektonischen Aktivitäten und zu den Hebungs- bzw. Absenkungsraten im Untersuchungsgebiet,

- Informationen zur tektonischen Stabilität des Endlagerstandortes und zum Einfluss von tektonischen Prozessen in angrenzenden Gebieten (Hebungen und Senkungen einzelner Gesteinsblöcke, Vorkommen und Intensität von Scherprozessen, Wahrscheinlichkeit der Veränderung der Grundwasserfließverhältnisse in der Zukunft).

Im Vergleich zu Salinarformationen, für die auf der Grundlage nur weniger Erkundungsbohrungen ausgehend von salzgenetischen Modellvorstellungen relativ gut abgesicherte Prognosen zum Vorkommen von möglicherweise lösungsführenden Anhydriten und von Kalisalzen innerhalb der Salzstruktur möglich sind, ist für kristalline Gesteine eine schlechte Prognostizierbarkeit des Baus und der Eigenschaften charakteristisch. Insbesondere betrifft dies das Vorkommen, die Eigenschaften und die Vernetzung von grundwasserführenden Störungszonen und Einschlüssen. Demzufolge ist die Ausweisung von ausreichend großen Einlagerungsfeldern mit möglichst homogenen, schwach durchlässigen Gesteinen oft sehr schwierig. Häufig gelingt dies, wenn überhaupt, nur mit aufwändigen, oft die geologische Barriere schädigenden Erkundungsarbeiten (große Anzahl von Tiefbohrungen erforderlich). Trotz sehr intensiver geologisch-geophysikalischer Untersuchungen bleiben aufgrund der schlechten Explorierbarkeit kristalliner Gesteine häufig im Ergebnis der Erkundungsarbeiten noch viele Unklarheiten zum Aufbau und zu den Rückhalteeigenschaften der geologischen Barriere bestehen. Dies betrifft vor allem:

- die prinzipiell eingeschränkten Möglichkeiten, im Ergebnis der geologischen Erkundungsarbeiten die räumliche Veränderlichkeit der häufig anisotropen kristallinen Gesteine sowie die Variabilität in der Verbreitung und in den Eigenschaften der Störungszonen zu erfassen,
- deutlich größere Datendefizite im Vergleich zum Salz und Tonstein durch größere Ungenauigkeiten in der Extrapolation vorliegender Erkundungsergebnisse auf Raum und Zeit,
- die ungenauen Kenntnisse zum zeitlichen Ablauf und zu den Einflussparametern auf die, im Umfeld eines Endlagers langfristig wirkenden geologischen Prozesse,
- Unklarheiten zu zufälligen, unvorhersehbaren Ereignissen im Untersuchungsgebiet. So z. B. werden Erdbeben auf der Grundlage statistischer Analysen (Poisson-Verteilung) mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit vorausgesagt, aber Zeitpunkt und Intensität können nicht genau vorhergesagt werden. Es verbleiben immanente Unsicherheiten, die in den mit Sprödbuchverhalten reagierenden kristallinen Gesteinen möglicherweise zu Einschränkungen im Isolationspotenzial der geologischen Barriere führen.

Der Ablauf und die bei der übertägigen Standorterkundung im Kristallin eingesetzten Verfahren variieren länderspezifisch. In Schweden wurde z. B. der Prozess der übertägigen Standorterkundung zweigeteilt. Eine sogenannte "Gesamterkundung" (Complete Site Investigation) erfolgte lediglich für etwa 5 – 10 km² große Gebiete, die im Ergebnis der "Ersterkundung" (Initial Site Investigation) als geeignet für die HAW-Endlagerung eingestuft wurden. Im Rahmen der übertägigen "Gesamterkundung" werden alle, für den vorläufigen Langzeitsicherheitsnachweis, die Standortauswahlentscheidung und die Optimierung des Endlagerkonzeptes erforderlichen Informationen gewonnen.

In allen weltweit in Realisierung befindlichen übertägigen Erkundungsarbeiten für HAW-Endlagerstandorte in kristallinen Gesteinen werden Untersuchungen in folgenden Teildisziplinen durchgeführt:

- geologische Kartierungen an der Erdoberfläche und in Erkundungsbohrungen, unterstützt durch den gezielten Einsatz geophysikalischer Messungen,
- Hydrogeologie und Hydrologie (z. B. Grundwasserstände, Grundwasserneubildung und -strömungsverhältnisse, Süßwasser/Salzwasser-Grenze, Vorfluter, Flussnetz),
- Hydrogeochemie,
- Fernerkundung,
- Felsmechanik (z. B. Deformationsverhalten, In-situ-Spannungen),
- thermische Eigenschaften der Wirtsgesteine,
- chemisch-physikalische Rückhalteeigenschaften der Gesteine,
- Ist-Zustand des oberflächigen Ökosystems zwecks Beweissicherung.

Hauptschwerpunkte der übertägigen geologischen Erkundungsarbeiten an potenziellen HAW-Endlagerstandorten in kristallinen Wirtsgesteinen sind die Lokalisierung von tektonischen Störungszonen oder Bereichen erhöhter Klüftigkeit sowie die Erfassung der lateralen Ausdehnung von möglichst homogen zusammengesetzten Wirtsgesteinsblöcken. So z. B. dienen die im Rahmen des finnischen Standortauswahlverfahrens durchgeführten übertägigen geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten vor allem (POSIVA 2005):

- zum Nachweis von Störungszonen und Inhomogenitäten sowie zur Bestimmung ihrer Eigenschaften,
- zur Untersuchung der hydrogeologischen Standortrandbedingungen,

- zur Bestimmung der lateralen und teufenmäßigen Verteilung sowie der Zusammensetzung der granitischen Wirtsgesteine sowie
- zur Analyse des Spannungsfeldes und der tektonischen Entwicklung der vorausgewählten Region.

Bei fehlender oder nur geringmächtiger Sedimentbedeckung der kristallinen Gesteine kann der Störungszonennachweis mittels Fernerkundung (z. B. Auswertung von Luftbild- bzw. Satellitenaufnahmen oder spezielle Laser-Scanner-Befliegungen, z. B. mittels LIDAR) sowie durch oberflächige geologische Kartierung oder „Trenching“, d. h. durch Freilegung von Störungen durch Schürfe erfolgen (siehe auch Kap. 3.1.1). Häufig kommen zur Lösung dieser Aufgabenstellung aerogeophysikalische Untersuchungen unter Verwendung moderner Hubschrauber- oder Flugzeug-gestützter Messverfahren zum Einsatz (Abb. 32). Insbesondere elektromagnetische (Multi-Frequenz-EM, VLF), magnetische und radiometrische Messmethoden ermöglichen die Abgrenzung von Störungszonen und Aussagen zur Homogenität der untersuchten Gesteinskomplexe (Abb. 33).

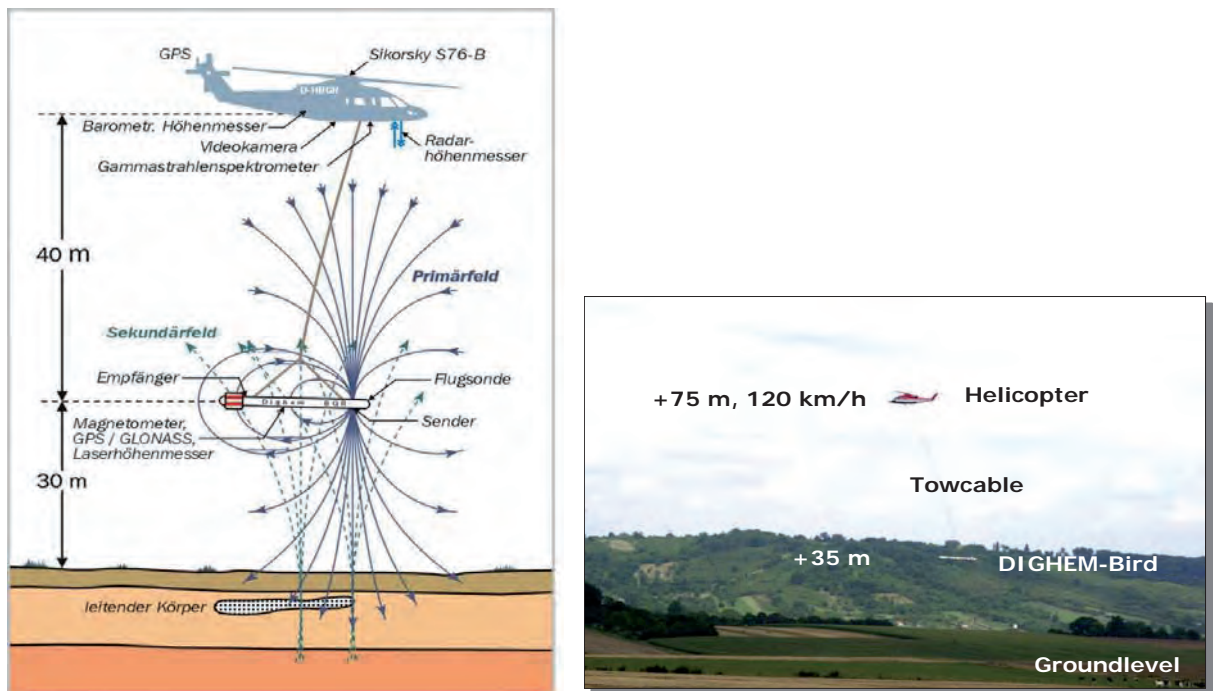


Abb. 32: Schematischer Aufbau und Rahmenbedingungen für die Anwendung eines Hubschrauber-gestützten geophysikalischen Messsystems (Quelle: BGR)

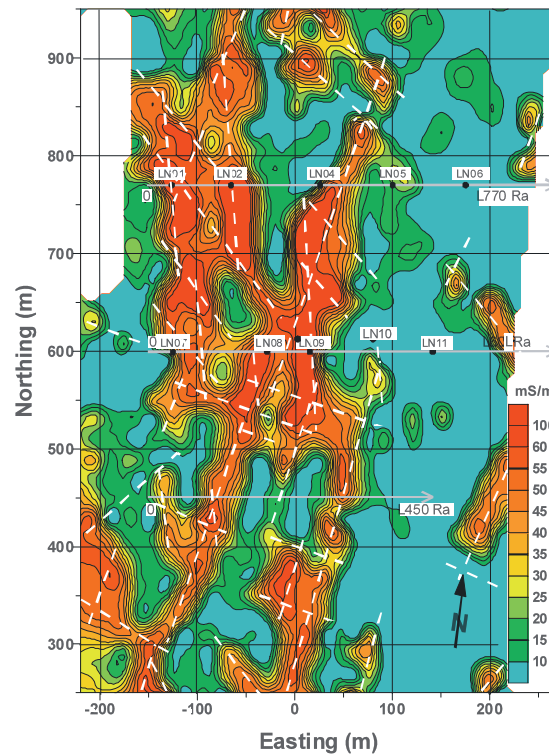


Abb. 33: Abgrenzung von mächtigen Störungszonen auf dem kristallinen Territorium Namibias mittels Hubschrauber-gestützter elektromagnetischer Messungen (Quelle: BGR)

Bei der Untersuchung des potenziellen finnischen HAW-Endlagerstandortes Olkiluoto mittels aerogeophysikalischer Verfahren wurden geomagnetische, elektromagnetische Dipol-, elektromagnetische VLF- sowie radiometrische Methoden eingesetzt (Abb. 34). Ergänzt wurden diese Arbeiten durch umfangreiche magnetische, elektromagnetische, seismische, geoelektrische und GPR- (Ground Penetrating Radar zur Charakterisierung oberflächennaher Strukturen) Messungen an der Erdoberfläche sowie magnetische, geoelektrische, Gamma-, Gamma-Gamma-Dichte- sowie seismische Messungen in den Erkundungsbohrungen (POSIVA 2005). Bei der Erkundung der beiden schwedischen Standortvarianten Forsmark und Oskarshamn wurden ebenfalls zahlreiche geophysikalische Methoden eingesetzt, um Daten zur Lithologie der Gesteine, zur Intensität von Verwitterungsprozessen, zum Vorkommen von Kluft- und Störungszonen sowie zu den hydrogeologischen Verhältnissen zu gewinnen (SKB 2008).



Abb. 34: Einsatz aerogeophysikalischer Messungen bei der geologischen Erkundung des finnischen HAW-Endlagerstandortes Olkiluoto (Mc EWEN & ÄIKÄS 2000)

Bei Vorhandensein von i.d.R. mehr als 30 m mächtigen Sedimentschichten oberhalb des kristallinen Wirtsgesteins werden für die Lokalisierung von Störungzonen gezielt Erkundungsbohrungen niedergebracht sowie oberflächige und bohrlochgeophysikalische Messungen, inklusive crosshole-tomographische Untersuchungen eingesetzt. Aufgrund der im Vergleich zum Salz schlechteren Explorierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Zusammensetzung und des strukturellen Baus von Kristallinkomplexen sind i.d.R. deutlich mehr, bis in das geplante Endlagerniveau hinabreichende und damit möglicherweise die geologische Barriere schädigende Erkundungsbohrungen als in Salzformationen erforderlich. Im Gebiet des US-Endlagerprojektes Yucca Mountain wurden auf einer Fläche von 5,5 km² insgesamt 329 tiefe Erkundungsbohrungen niedergebracht.



Abb. 35: Anwendung von überwiegend abgelenkten Erkundungsbohrungen zur Lokalisierung und Untersuchung von Störungszone am finnischen Endlagerstandort Olkiluoto (Posiva 2005)

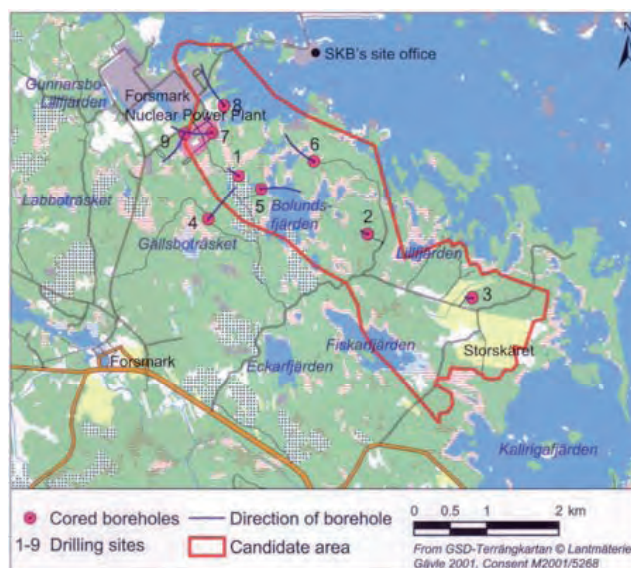


Abb. 36: Lage und Orientierung der am potenziellen schwedischen HAW-Endlagerstandort Forsmark niedergebrachten tiefen, größtenteils abgelenkten Erkundungsbohrungen (SKB 2005b)

Zur Erfassung der räumlichen Lage und der Eigenschaften der Störungszonen sind im Unterschied zu den meist vertikalen Erkundungsbohrungen an Salzstandorten (siehe Kap. 3.1.2) häufig geneigte Bohrungen notwendig (Abb. 35 und 36). Die Anzahl der Bohrungen schwankt stark, liegt aber deutlich höher als bei der Erkundung von Salzstandorten. An den potenziellen schwedischen Endlagerstandorten wurden 12 (Forsmark) bzw. 14 (Oskarshamn) zwischen 200 m und 1000 m tiefe, meist gekernte Erkundungsbohrungen mit einem Bohrungsdurchmesser von 76 mm niedergebracht. Ergänzt wurden diese Arbeiten durch zahlreiche, häufig nicht gekernte flache (zwischen 30 und 120 m tiefe) und ultraflache (zwischen 2 und 18 m tiefe) Bohrungen (percussion boreholes, z. B. am Standort Forsmark 40 bzw. 90 Bohrungen). Charakteristisch ist, dass um eine zentrale Tiefbohrung herum jeweils mehrere flachere Bohrungen angeordnet wurden (Abb. 37).



Abb. 37: Lage der Erkundungsbohrungen zur Untersuchung des Umfeldes des potenziellen schwedischen HAW-Endlagerstandortes Oskarshamn auf den Halbinseln Laxemar und Simpevarp (SKB 2005a)

Die Kerne der Erkundungsbohrungen dienen zur lithologischen bzw. petrographischen Ansprache sowie zur Analyse des Gefüges, wie z. B. zum Nachweis von Deformationsstrukturen in den Gesteinen. An den aus den Kernen entnommenen Gesteinsproben erfolgen mikroskopische und röntgenographische Untersuchungen des Mineralbestandes, Analysen der geochemischen Zusammensetzung der Gesteine, Bestimmungen des Porenraumes bzw. der Porosität und der Permeabilität sowie Laboranalysen der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine. Von besonderer

Wichtigkeit sind Aussagen zur Alteration der Gesteine und zu Mineralneubildungen in Störungszonen und Klüften.

Neben der geologischen Kartierung (inklusive Erkundungsbohrungen) werden bei der Untersuchung von Kristallin-Standorten meist umfangreiche geophysikalische Messungen durchgeführt. Im Unterschied zu Standorten in Salzformationen (siehe Kap. 3.1.2 und 3.1.3), die fast ausschließlich mittels seismischer Messverfahren untersucht werden, sind kristalline Gesteine durch diese Methode aufgrund oft fehlender seismischer Kontraste i.d.R. nur schlecht zu charakterisieren und Störungszonen meist nur ungenügend detektierbar. Mittels oberflächlich durchgeführter seismischer Untersuchungen können nur Grenzschichten oder Störungszonen nachgewiesen werden, die nicht zu steil stehen. 2D- oder 3D-Seismik kommt, wenn überhaupt, lediglich bei mächtiger Sedimentüberdeckung zur Bestimmung der Lage der Festgesteinsoberfläche und zum Nachweis von flach einfallenden Störungen im Deckgebirge zum Einsatz.

Die am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Forsmark durchgeführten umfangreichen seismischen Untersuchungen (1200 Schusspunkte auf insgesamt mehr als 20 km langen Seismikprofilen) dienten ebenso wie die am potenziellen Endlagerstandort Oskarshamn eingesetzten refraktionsseismischen Untersuchungen lediglich zur Bestimmung der Kristallinoberkante und zum Nachweis flach einfallender Störungen im Deckgebirge. Der Nachweis steil einfallender und tiefer liegender Störungszonen erfolgte mittels AMS (Anisotropic Magnetic Susceptibility), VES (Vertical Electric Sounding) und TEM (Transient Electromagnetic Sounding) (Abb. 38 und 39).

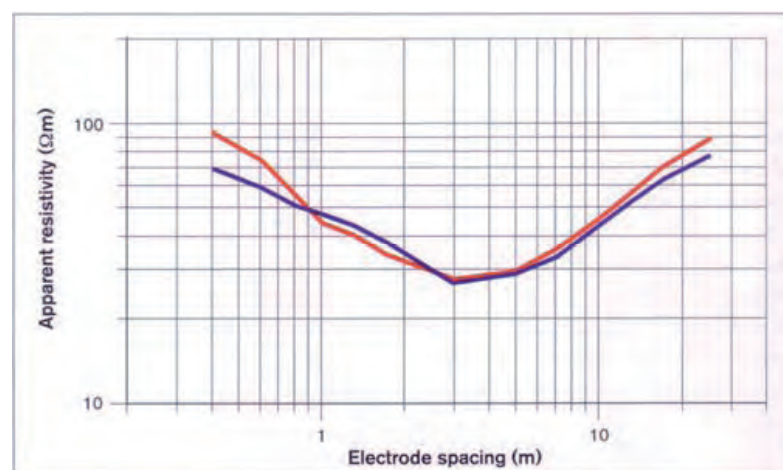


Abb. 38: Resultate geoelektrischer Messungen (VES-Methode) am Standort Oskarshamn zur Ausweisung einer Störungszone (SKB 2005a)



Abb. 39: Abgrenzung einer mächtigen Störungszone im kristallinen Wirtsgestein am potenziellen schwedischen HAW-Endlagerstandort Oskarshamn auf der Grundlage geomagnetischer Untersuchungen (AMS-Methode, SKB 2005a)

An den meisten Standorten werden für die Bestimmung von Diskontinuitäten bzw. Inhomogenitäten in magmatischen Gesteinen vor allem geoelektrische, geomagnetische und gravimetrische Messungen eingesetzt. Im Regelfall wird mit einem Punktabstand von 500 m, seltener 250 m gearbeitet. Die Auswahl der konkreten geoelektrischen, geomagnetischen oder gravimetrischen Messverfahren zur Charakterisierung des Aufbaus des Deckgebirges und des Wirtsgesteins (insbesondere Störungszonennachweis) ist von der Mächtigkeit und Leitfähigkeit der Gesteinskomplexe abhängig.

So z. B. kam bei der übertägigen Erkundung (Maßstab 1 : 100.000 bis 1 : 25.000) des potenziellen HAW-Endlagerstandortes Jenisejskij im Exokontakt (archaisch-proterozoische Gneise) des Nischnekansker Granitoidkomplexes (nahe Schelesnogorsk, bei Krasnojarsk, zentrales Südsibirien, siehe HAMMER 2005) eine Kombination aus geoelektrischen, geomagnetischen, gravimetrischen und seismischen Messungen zum Einsatz. Ergänzt wurden diese Arbeiten zum Störungszonennachweis durch Helium- und Radon-Messungen an der Erdoberfläche. Die Messungen erfolgten auf mehreren, sich annähernd senkrecht schneidenden Profilen mit einer Gesamtlänge von ca. 70 km und einem Messpunktabstand von ca. 250 m (Abb. 40). Insbesondere die geoelektrischen („Methode der audiomagnetischen Sondierung – AMTS“ und „Vertikale elektrische Sondierung - VES“) und geomagnetischen Messungen ermöglichten wichtige Schlussfolgerungen zum Vorkommen von Störungszonen und gering geklüfteten Gesteinsbereichen mit sehr geringen Inhomogenitätskoeffizienten der geophysikalischen Felder (Abb. 41). Die Ergebnisse dieser Messungen dienten als Grundlage für die Entscheidung zur Auswahl des Standortes für die Errichtung eines URL.

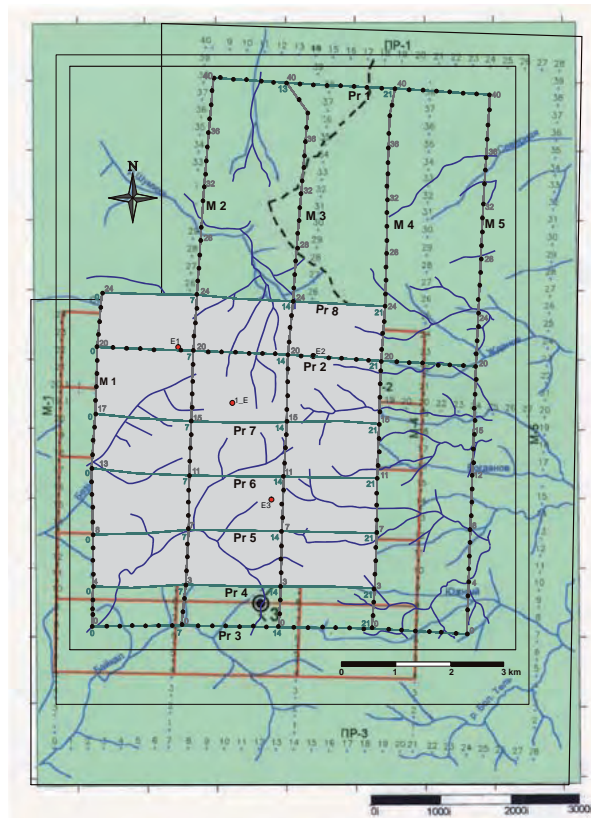


Abb. 40: Lage der geophysikalischen Messprofile zur Erkundung des potenziellen russischen HAW-Endlagerstandortes in der Nähe von Schelesnogorsk (bei Krasnojarsk, südliches Zentralsibirien)

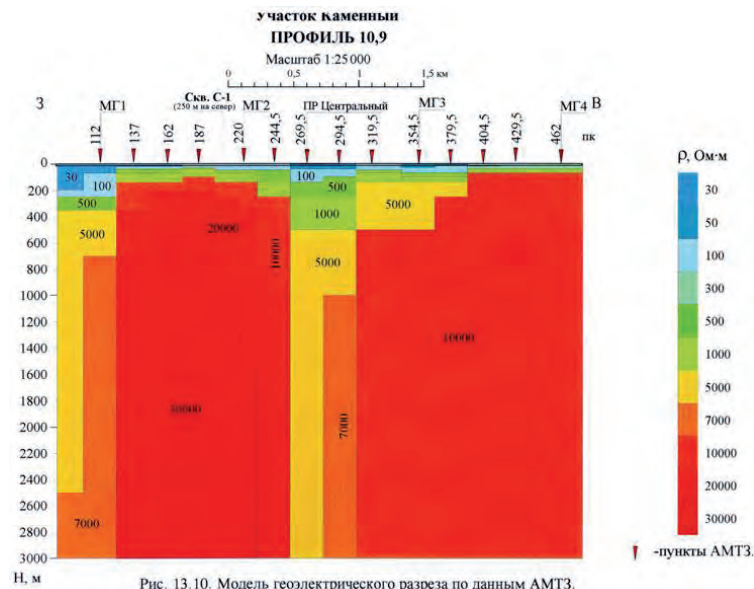


Abb. 41: Mittels audiomagnetotellurischer Sondierung (AMT3) erzeugtes Vertikalprofil der Widerstandsverteilung durch den potenziellen HAW-Endlagerstandort „Kamennyj“ in der Nähe von Schelesnogorsk (bei Krasnojarsk, südliches Zentralsibirien). Gut abzugrenzen sind die bläulich-grünlich-gelblich gehaltenen Bereiche geringer elektrischer Widerstände, die mächtigen Störungszonen entsprechen.

Im Rahmen ihrer Standortuntersuchungen in französischen granitischen Gesteinen setzte auch die ANDRA aero- und oberflächengeophysikalische Messverfahren ein (ANDRA 2005a). Mittels Kombination von Hubschrauber-gestützten aeromagnetischen, elektromagnetischen, gammaspektroskopischen und vor allem VLF-EM-Messungen (very low frequency magnetic field) ist es gelungen, lineare Zonen erhöhter Leitfähigkeit nachzuweisen. Die an der Erdoberfläche zusätzlich durchgeführten gravimetrischen Untersuchungen lieferten wichtige Informationen zur Mächtigkeit der Granitkörper und zum Vorkommen mächtiger Störungszonen, die durch die Ergebnisse geoelektrischer (bis in einige Zehner Meter Tiefe reichend) und elektromagnetischer Messungen (bis in mehrere Hundert Meter Tiefe) ergänzt wurden (ANDRA 2005a). Der Einsatz seismischer Untersuchungsverfahren erwies sich aufgrund zu geringer Kontraste als nicht zielführend. Außerdem können die meist vertikalen Störungszonen mittels oberflächlich durchgeführter seismischer Verfahren nicht oder nur schlecht erfasst werden. Dazu sind tomographische seismische Messungen zwischen Bohrungen oder bergmännischen Auffahrungen erforderlich.

Ähnlich wie in Frankreich wurden zur Charakterisierung der granitoiden Wirtsgesteine an den potenziellen finnischen Endlagerstandorten aero- und oberflächengeophysikalische Messungen eingesetzt. Mit Hilfe eines Hubschrauber-gestützten Messsystems wurden geomagnetische, elektromagnetische (mit 3 unterschiedlichen Frequenzen), VLF- und gammaspektroskopische Messungen (totale Gamma-Aktivitäten sowie U-, Th- und K-Bestimmungen) zur Erfassung des Störungszoneninventars durchgeführt. Parallel dazu an der Erdoberfläche realisierte Ground Penetrating-Radarmessungen und elektromagnetische VLF-Messungen dienten zum Nachweis von Blockgrenzen und Störungszonen („fracture mapping“). Außerdem erfolgten Radarmessungen zur Bestimmung der Mächtigkeit des unkonsolidierten Deckgebirges und der Lage der Kristallinoberfläche sowie seismische Messungen zur Überprüfung der geophysikalischen Anomalien, die im Ergebnis der Hubschrauber- und Oberflächengeophysik identifiziert wurden. Zusätzlich eingesetzte gravimetrische Untersuchungen gestatteten eine bessere Bestimmung der Kontakte zwischen den unterschiedlichen Lithotypen.

An den fünf vorausgewählten finnischen Standorten (siehe HAMMER et al. 2009) wurden jeweils eine ca. 1000 m tiefe und vier jeweils ca. 500 m tiefe Erkundungsbohrungen niedergebracht. Zur besseren Erfassung der Schieferungsflächen bzw. Störungszonen wurden i.d.R. geneigte Bohrungen eingesetzt. In den, bis in das geplante Endlagerniveau reichenden Bohrungen erfolgten umfangreiche bohrlochgeophysikalische und hydraulische Messungen. Dabei kamen folgende Bohrlochmessverfahren zur Anwendung:

- Widerstands-Messungen mit unterschiedlichen Elektrodenanordnungen (z. B. Wenner-Anordnung mit sehr engen Elektrodenabständen),
- Messungen des elektrischen Potentials,

- Gamma-Gamma-Dichte-Messungen,
- Messungen der natürlichen Gamma-Aktivität,
- Messungen der magnetischen Suszeptibilität,
- Neutron-Neutron-Messungen zur Bestimmung der Porositäten,
- Kaliber-Log,
- Neigungs-Log sowie
- Temperatur-Log.

Die Identifizierung und Charakterisierung der Störungszonen in den Bohrungen bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld erfolgte vor allem durch die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur sowie durch eine Kombination von akustischem Bohrlochfernsehen (Borehole Image Processing System, BIPS), Dipmetermessungen und optischem Televiwer (Detektierung von Bohrlochwandausbrüchen). Die Dipmeter-Logs dienten zur Bestimmung des Einfallens der in den Bohrungen angetroffenen Schichtgrenzen bzw. Kontakte sowie Störungszonen. Ergänzend durchgeführte VSP-Messungen mit einem 3-Komponenten-Geophon-System und Bohrloch-Radarmessungen ermöglichten eine bessere Auswertung von oberflächlich durchgeführten seismischen Messungen und den Nachweis von Reflektoren bzw. Störungszonen im Bohrungsumfeld oder im Zwischenraum von Bohrungen. An den schwedischen Endlagerstandorten wurden mit Ausnahme der Messungen des elektrischen Potentials sowie der Neutron-Messungen die gleichen Messmethoden eingesetzt, ergänzt durch Salinitätsmessungen.

Zwecks Bestimmung der In-situ-Stressbedingungen erfolgten am finnischen Standort Olkiluoto hydraulic fracturing-Messungen („Hydrofrac-Versuche“) in kurzen Doppelpacker-Intervallen und Überbohrversuche (POSIVA 2005, Abb. 42). Für die Messungen wurde die in Abb. 43 dargestellte Überbohrvorrichtung („Borre probe“ der Firma SwedPower) eingesetzt. Ähnliche Untersuchungen erfolgten auch an den potenziellen schwedischen Endlagerstandorten Forsmark und Oskarshamn.

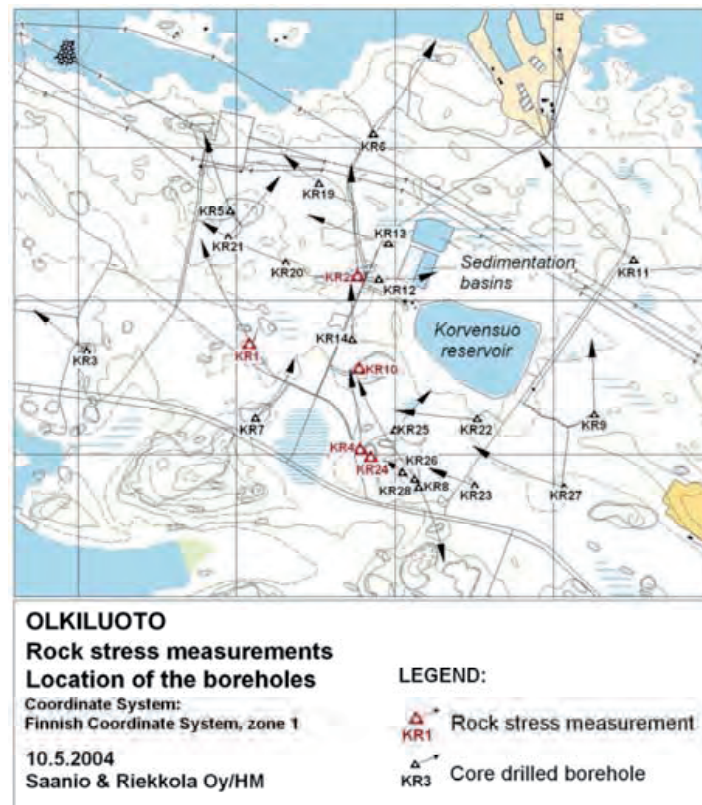


Abb. 42: Lage der fünf Bohrungen am finnischen Standort Olkiluoto, in denen in einer Tiefe zwischen 300 und 800 m die In-situ-Stressbedingungen bestimmt wurden (Posiva 2005)



Abb. 43: Gerät zur Durchführung von Überbohrversuchen in tiefen Erkundungsbohrungen zur Ermittlung der Gebirgsspannungen am Standort Olkiluoto, Finnland („Borre probe“, SwedPower, Posiva 2005)

Zwecks Analyse der hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und des Deckgebirges (z. B. Bestimmungen der hydraulischen Durchlässigkeiten, Grundwasserfließgeschwindigkeiten und hydraulischen Gradienten) wurden zwischen 1997 und 2000 an den finnischen Standorten Olkiluoto, Romuvaara und Kivetty in den Erkundungsbohrungen oder in speziell dafür niedergebrachten hydrogeologischen Bohrungen Pumpversuche oder Packertests (z. B. Multiphase-Packertest, Interferenztest) durchgeführt. Aufgrund

der z. T. großen Tiefen der Erkundungsbohrungen (bis zu 1000 m tief) und der geringen Bohrungsdurchmesser (meist 56 mm) mussten dafür spezielle leistungsfähige technische Ausrüstungen entwickelt werden (POSIVA 2005).

Sowohl in Finnland als auch in Schweden wurden zahlreiche head injection Tests durchgeführt. Am Standort Forsmark in Schweden erfolgten z. B. 90 derartige Tests, ergänzt durch Pumptests (flow logging) unter Einsatz von Packern und Drucksensoren mit Testintervallen zwischen 5 und 100 m. Im Verlaufe der Erkundung der potenziellen finnischen Endlagerstandorte wurden ab 100 m Tiefe in 31 m-Schritten Packerexperimente realisiert. In Zonen mit hohen Durchlässigkeiten erfolgten zusätzliche Messungen mit Packerintervallen von jeweils 7 m. An den schwedischen Standorten wurden ergänzend zahlreiche „transient tests in multi-level piezometers“ und Tracer-Tests zur Erkundung der hydrogeologischen Randbedingungen eingesetzt. Die Tracer-Versuche wurden als „single well injection withdrawal tests“ oder als cross hole-Tracer-Tests mit einer Injektionsbohrung und drei, im Abstand zwischen 100 m und 200 m davon platzierten Bohrungen durchgeführt.

Die genannten Arbeiten wurden durch Bestimmungen der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer (unter Einschluss von redoxsensitiven Parametern, wie $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, HS^-) zwecks Erfassung der Änderung der Grundwasserchemie mit der Teufe sowie durch Altersbestimmungen der Grundwässer (Grundwasserverweilzeiten) ergänzt. Da in größerer Tiefe immer wieder stärker durchlässige, nicht oder nur schwer von der Erdoberfläche detektierbare Störungzonen vorkommen können, bleibt ein hoher Bedarf an untertägiger Erkundung des strukturellen Baus des Einlagerungsbereiches und -umfeldes bestehen.

Die Bestimmung der physikalisch-chemischen Rückhalteeigenschaften der Wirtsgesteine und ihrer thermischen Parameter erfolgt an Bohrkernproben im Labor oder in-situ im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung (siehe Kap. 3.2.1). Am Standort Forsmark wurden die thermischen Eigenschaften der granitoiden Gesteine bereits im Verlaufe der übertägigen Erkundungsarbeiten durch einen Heater-Versuch in einer Erkundungsbohrung bestimmt, gekoppelt mit crosshole-Messungen (Abb. 44).

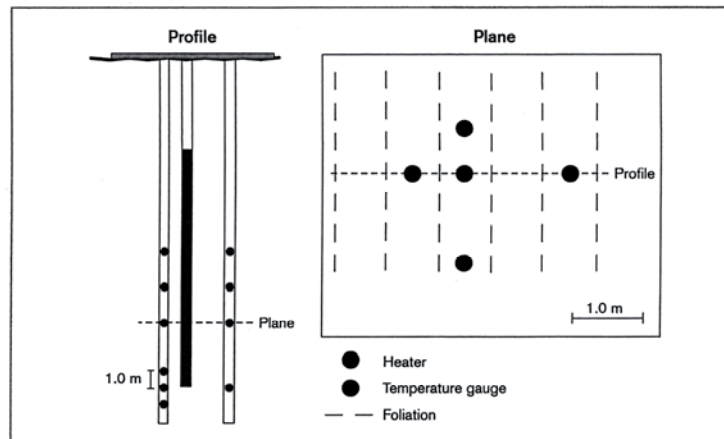
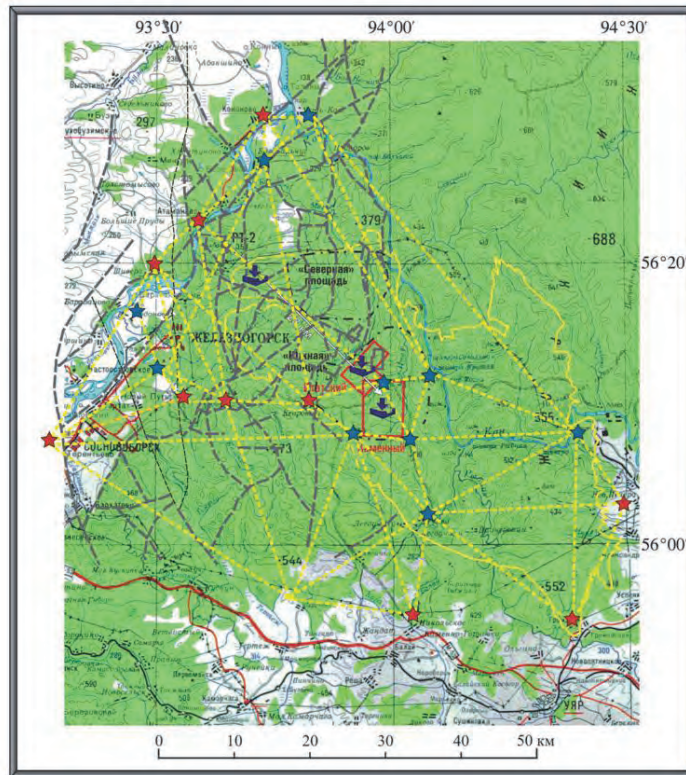


Abb. 44: Schematische Darstellung zur Anordnung der Bohrungen für den Heater-Versuch am Standort Forsmark (SKB 2005b)

Zusätzlich zu den genannten Standortuntersuchungen müssen im Ergebnis der Erkundungsarbeiten und von darauf basierenden Langzeitsicherheitsanalysen für den Endlagerstandort und sein näheres Umfeld intensive seismische Erschütterungen und Vorkommen von neotektonisch aktiven Störungszonen ausgeschlossen werden. Für die Erfassung seismischer bzw. neotektonischer Ereignisse sind präzise geodätische Messungen bzw. detaillierte seismologische und geomorphologische Beobachtungen erforderlich. Empfohlen wird die Errichtung eines mikroseismischen Messnetzes an der Erdoberfläche oder in Bohrungen. Zwecks Erfassung rezent ablaufender geotektonischer Bewegungen ist die Durchführung von Satelliten-gestützten Messungen, d. h. der Einsatz von GPS- oder PS-InSAR-gestützten Messungen von Horizontal- und Vertikalverschiebungen von Messpunkten auf unterschiedlichen Seiten von Störungszonen weit verbreitet (z. B. in Russland, Abb. 45). Auch in Finnland und Schweden wurden zur Erfassung rezent ablaufender Deformationsprozesse, d. h. zum Nachweis von Vertikal- und Horizontalbewegungen einzelner Gesteinsblöcke entlang von Störungszonen, GPS-Monitoring-Systeme eingerichtet (Abb. 46 und 47). Alle Messpunkte wurden zweimal pro Jahr vermessen, mit einer Genauigkeit von 1 mm (horizontal) bzw. 2-3 mm (vertikal; POSIVA 2005). In Schweden wird das GPS-System zur Erfassung der horizontalen Blockverschiebungen genutzt (Abb. 47), ergänzt durch Din-SAR-Messungen der Vertikalbewegungen (SKB 2005b, Abb. 48).



- ★ GPS-site of first stage 2005.
- ★ GPS-site of second stage 2006.

Abb. 45: Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Horizontal- und Vertikalverschiebungen einzelner geologisch-tektonischer Blöcke im Umfeld des potenziellen HAW-Endlagerstandortes nahe Krasnojarsk, Russland (KAMNEV et al. 2005)



Abb. 46: Lage der GPS-Messpunkte (Kreise) und der mikroseismischen Messstationen (grüne Vierecke) im Gebiet Olkiluoto, Finnland (POSIVA 2005)

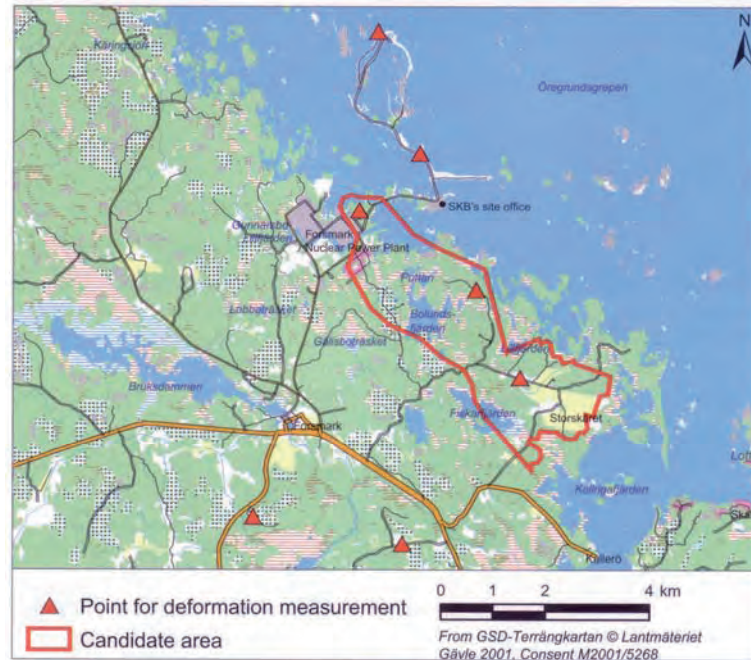


Abb. 47: Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Blockverschiebungen am potenziellen HAW-Endlagerstandort Forsmark, Schweden (SKB 2005b)

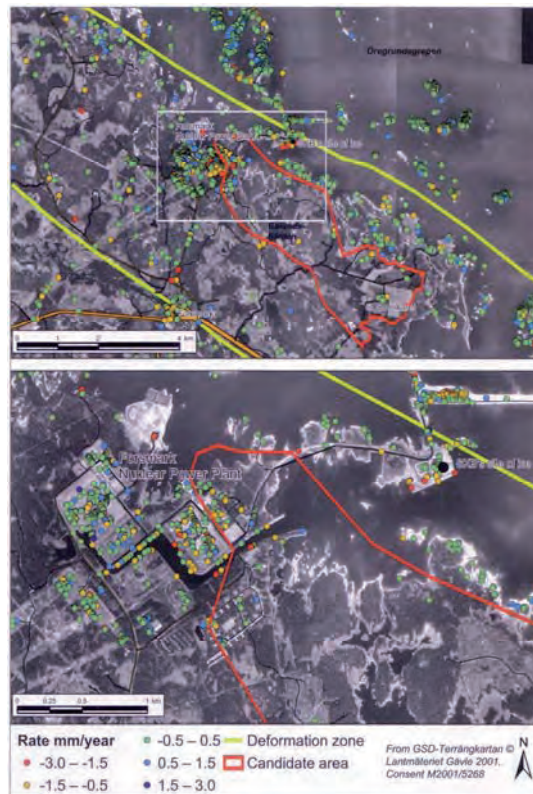


Abb. 48: Ergebnisse der Satelliten-gestützten Messungen von deformationsbedingten Höhenverschiebungen am Standort Forsmark, Schweden (SKB 2005b)

Abschätzungen der zukünftig am Endlagerstandort zu erwartenden tektonischen Bewegungen und seismischen Erschütterungen müssen über eine allgemeine Bewertung des seismischen Gefährdungsgrades hinausgehen. Empfohlen wird ein Langzeitmonitoring der seismischen Aktivitäten in der Region sowie auf statistischer Grundlage (Erdbebenkatalog) und auf exakten geomechanischen Berechnungen basierende Ableitungen der Wahrscheinlichkeit von Kluffbildungen bzw. -veränderungen durch geodynamische Prozesse (siehe z. B. MOROZOV et al. 2007, BELOV et al. 2007). Ergänzt werden sollten diese Daten durch Aussagen zum Einfluss Erdbeben-induzierter Scherdeformationen auf im Untersuchungsgebiet existierende Störungszonen und Untertageanlagen. Derartige Berechnungen sind notwendig für die Optimierung der technischen und geotechnischen Barrieren mit dem Ziel einer besseren „Verdauung“ von Erdbeben-induzierten Scherdeformationen bei Überschreitung zulässiger plastischer Deformationen.

3.2 Untertägige Standorterkundung

Die untertägige Standorterkundung hat das Ziel, alle Daten bereit zu stellen, die für die Durchführung der standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse (safety case) sowie für die Planung des Endlagerbergwerkes und die Optimierung des Endlagerkonzeptes erforderlich sind. Gemeinsam mit den Daten aus den übertägigen Erkundungsarbeiten bilden die Ergebnisse der untertägigen Standorterkundung die Grundlage für das zur Genehmigung des Endlagers durchzuführende Planfeststellungsverfahren und für die Szenarienbewertungen sowie für die Planung eines sicheren Bergbaubetriebs und der abschließenden Verfüll- und Verschlussmaßnahmen.

Die bei der untertägigen Erkundung durchzuführenden Arbeiten sind vom Wirtsgesteinstyp, d. h. von den gesteinspezifischen Erkundungszielen, vom Endlagerkonzept und von den bei der Langzeitsicherheitsanalyse erforderlichen Daten abhängig. Für die Durchführung einer Langzeitsicherheitsanalyse bzw. für den Standorteignungsnachweis sind vor allem Aussagen zur Einhaltung der Standortanforderungen, Modellberechnungen zu möglichen Radionuklidfreisetzungen und -migrationen im Falle von Störfällen im Endlagerbetrieb, Berechnungen der Wärme- und Strahlungseinwirkungen der radioaktiven Abfälle auf das Nebengestein sowie Prognosen zur langzeitlichen geologischen Entwicklung des zu bewertenden Standorts notwendig (CHAPMAN & MCKINLEY 1987, SAVAGE 1995).

Zwecks Ausschaltung von Ungenauigkeiten in den Sicherheitsmodellierungen müssen die endlagerrelevanten Gesteinsparameter und die Einflussfaktoren auf die Langzeitsicherheit des Endlagers möglichst im geplanten Endlagerniveau am vorgesehenen Endlagerstandort oder in dessen unmittelbarer Nähe analysiert werden. Die zur Detailcharakterisierung des strukturellen Baus und der Eigenschaften der Endlagerwirtsgesteine erforderlichen untertägigen Untersuchungen werden in

Untertagelabors (URL) oder in Erkundungsbergwerken durchgeführt, die dem eigentlichen Endlagerbau möglichst am selben Standort vorgeschaltet sind. Eine Übersicht über weltweit aktive URL's findet sich in PUSCH (2008). Erst wenn die im URL oder im Erkundungsbergwerk durchgeführten Untersuchungen und die darauf aufbauenden standortbezogenen Langzeitsicherheitsanalysen die Eignung des Wirtsgesteins und des Standortes für die HAW-Endlagerung nachweisen, kann die Entscheidung zum Bau des Endlagers an diesem oder einem anderen naheliegenden, im selben Wirtsgestein positionierten Standort (siehe z. B. aktuelle Entwicklung in Frankreich, HAMMER et al. 2009) getroffen werden.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen „generischen“ und standortspezifischen Untertagelabors. Am Standort „generischer“ URL ist keine Endlagerung vorgesehen bzw. möglich. Um Kosten zu sparen, benutzt man für diese Art von URL häufig Bergwerke, die nicht mehr im Abbau befindlich sind, oder andere untertägige Hohlräume (z. B. Stripa in Schweden, Mont Terri in der Schweiz). Sie liegen oft nicht in unmittelbarer Nähe zu den geplanten Endlagerstandorten. In der Schweiz bestehen mit den Untertagelabors Grimsel (Kristallin bzw. Granitgneis) und Mont Terri (Opalinuston) zwei „generische“ URL's, in denen Forschungsarbeiten zur Charakterisierung der Gesteins- und Gebirgseigenschaften durchgeführt und spezielle Untersuchungsmethoden In-situ getestet werden. Auch das in der kanadischen Provinz Manitoba, ca. 120 km NE von Winnipeg, in proterozoischen, etwa 2.600 Mio. a alten granitoiden Gesteinen gelegene URL White Shall (EVERITT et al. 1998) stellt ein „generisches“ URL dar, ebenso wie das im kreidezeitlichen Rioke-Granitkomplex in Zentraljapan liegende URL Mizunami (JAEC 1997).

Das von der ANDRA betriebene französische Untertagelabor Meuse/Haute Marne gilt, obwohl an dem Standort nach derzeitigem Planungsstand keine Endlagerung vorgesehen ist, als standortspezifisches URL. Es liegt sowohl in der vorgesehenen Standortregion wie auch im potenziellen Wirtsgestein (Callovo-Oxfordian-Ton) im Ostteil des Pariser Beckens und befindet sich in einer Tiefe, die etwa dem geplanten Endlagerniveau entspricht. Ähnliches gilt für die in granitoiden Gesteinen in der Nähe potenzieller HAW-Endlagerstandorte befindlichen standortspezifischen URL in Finnland (ONKALO, nahe Olkiluoto) und Schweden (Äspö, nahe Oskarshamn, siehe HAMMER et al. 2009).

In Deutschland wurde seit Mitte der 60iger Jahre das Forschungsbergwerk Asse, das einem „generischen“ URL entspricht, für die Durchführung von In-situ-Versuchen zur Einlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle im Steinsalz genutzt (siehe Kap. 3.2.2.1). Zusätzlich fließen, wie in anderen Ländern auch, die Ergebnisse von Experimenten, die in Bergwerken an anderen Standorten im selben Wirtsgesteinstyp realisiert wurden, sowie die Resultate umfangreicher, im Erkundungsbergwerk Gorleben bis zum Moratorium im Oktober 2000 durchgeführter In-situ-Messungen als Ausgangsdaten in die Langzeitsicherheitsmodellierungen ein. Die im URL Asse durchgeführten Untersuchungen stellen eine wichtige Grundlage für die Entwicklung und Optimierung des deutschen Endlagerkonzeptes für Steinsalz dar.

3.2.1 Wirtsgesteinsunabhängige Untersuchungen

Die untertägige Standorterkundung umfasst detaillierte Analysen der Zusammensetzung und des strukturellen Baus der Wirtsgesteinsformation sowie umfangreiche Studien der geologischen bzw. hydrogeologischen Verhältnisse im vorgesehenen Endlagerniveau und In-situ-Bestimmungen der endlagerrelevanten Eigenschaften des Wirtsgesteins am (möglichen) Endlagerstandort. Außerdem erfolgen im Rahmen der untertägigen Erkundung umfassende Untersuchungen zur Klärung der Bedingungen und Einflussfaktoren auf möglicherweise im Endlagerbereich ablaufende Freisetzungs- und Transportprozesse für die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide. Diese Daten dienen zur Überprüfung der Richtigkeit der in dieser Phase noch vorläufigen Standort-Auswahlentscheidung, d. h. sie bilden die Grundlage für die Eignungsbewertung des potenziellen Endlagerstandortes.

Im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung werden zusätzlich Untersuchungen zur Wirkungsweise und zur Optimierung der (geo)technischen Barrieren durchgeführt sowie die geplanten Einlagerungskonzepte auf ihre Machbarkeit getestet und ggf. validiert. Außerdem werden im Verlaufe des Schachtabteufens bzw. beim Tunnelvortrieb die im Rahmen übertägiger Erkundungsarbeiten gewonnenen Erkenntnisse über das Deckgebirge und den im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches gelegenen Teil der Wirtsgesteinsformation vertieft.

Schwerpunktmäßig werden bei der untertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten Untersuchungen zu folgenden Themenkomplexen, z. T. als Ergänzung zu den Ergebnissen übertägiger Erkundungsarbeiten durchgeführt:

- detaillierte stofflich-strukturelle Charakterisierung des Endlagerwirtsgesteins, wobei die endlagerrelevanten Gebirgs- und Gesteinsparameter im vorgesehenen Endlagerniveau erfasst werden müssen,
- Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches,
- Analyse des strukturgeologischen Baus der zur HAW-Einlagerung vorgesehenen Gesteinsbereiche (z. B. Vorkommen und Orientierung von Klüften und Störungszonen, Lagerungsbedingungen der Gesteine, Faltung, Inhomogenitäten),
- Bestimmung der In-situ-Spannungsverhältnisse (Größe und räumliche Orientierung der Spannungsvektoren, Variation der Spannungsfelder mit zunehmender Tiefe),
- Untersuchung endlagerrelevanter Prozesse, wie z. B. des Verhaltens des Wirtsgesteins bei der Einlagerung von Wärme entwickelnden hochradioaktiven Abfällen,

- Analyse des Einflusses hydraulischer, geochemischer und physikalischer Parameter auf den Transport von Radionukliden,
- Untersuchung der Prozesse im Nahfeldbereich (Wärmeabtransport, Spannungsauf- und -abbau, Druck- und Temperatur-abhängige Deformationen),
- Demonstrationsversuche zur Interaktion zwischen der geologischen und den (geo)technischen Barrieren (z. B. Gasmigration, Radionuklidretardation),
- Weiterentwicklung der technischen und geotechnischen Barrieren unter In-situ-Bedingungen,
- praktische Überprüfung des Endlagerkonzeptes und seiner bautechnischen Machbarkeit,
- In-situ-Studien zur Optimierung des Designs des Endlagers und der Geometrie der Einlagerungsstrecken,
- Untersuchungen zur Optimierung der Methoden der bergmännischen Auffahrungen sowie der Bohr- und Sprengverfahren,
- Optimierung von Erkundungs- und Monitoringmethoden, die beim Endlagerbau bzw. -betrieb sowie in der Nachbetriebsphase zum Einsatz kommen,
- Demonstration der Einlagerungstechnik bzw. Tests der Technik unter realen Bedingungen.

Die bei der untertägigen Standorterkundung eingesetzten Untersuchungsverfahren können untergliedert werden in:

- Geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen
- Hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsverfahren
- Geomechanische und thermophysikalische Untersuchungsmethoden
- Untersuchungen endlagerrelevanter gekoppelter Prozesse.

3.2.1.1 Geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen

Die untertägigen geologisch-geophysikalischen Standortuntersuchungen dienen in erster Linie zur detaillierten Analyse des strukturellen Baus und der Zusammensetzung der Wirtsgesteinsformation sowie zur Sammlung der Informationen, die für die Endlagerplanung und die Optimierung des Einlagerungskonzeptes erforderlich sind. Außerdem erfolgt im Rahmen der untertägigen geologischen Erkundung mit dem Ziel der Beweissicherung eine lückenlose Dokumentation und detaillierte Beprobung der bei der Auffahrung des Erkundungs- bzw. Endlagerbergwerkes angetroffenen geowissenschaftlichen Standortgegebenheiten. Auf der Grundlage der Ergebnisse der geologischen Erkundungsarbeiten wird, unter Ausweisung von Sicherheitspfeilern zu Störungszonen oder zu Gesteinstypen bzw. -bereichen, die für die HAW-Einlagerung ungeeignet sind, die Abgrenzung der Wirtsgesteinsvolumina vorgenommen, in denen die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle möglich ist.

Die geologische Erkundung erfolgt unter Tage vor allem durch Schächte und Strecken, deren Stöße, angepasst an den bergmännischen Teuf- bzw. Vortriebsfortschritt, im Maßstab 1:100 bzw. 1:50 schrittweise und vollständig aufgenommen sowie dokumentiert werden. Die geologische Kartierung wird durch die geologische Aufnahme von Bohrkernen und die Probenahmen an den Stößen und Bohrkernen ergänzt. Die Kartierung beinhaltet die Erfassung sämtlicher, im Maßstab darstellbarer tektonischer und Strukturelemente, wie z. B. Störungen, Klüfte, B-Achsen und Schichtflächen. Zusätzlich erfolgt eine Fotodokumentation der Bohrkern- und relevanter Streckenbereiche. Bereits bei den Kartierarbeiten und im Ergebnis nachfolgender, z. B. mikroskopischer, röntgendiffraktometrischer oder geochemischer Laboruntersuchungen werden die in den Aufschlüssen angetroffenen Gesteine lithologisch, petrographisch und mineralogisch-geochemisch charakterisiert. Tonsteine oder Salzgesteine werden auf der Grundlage dieser Daten exakt stratigraphisch und ggf. faziell eingeordnet. Je nach Wirtsgestein müssen für die stratigraphische bzw. petrographische Einordnung der Gesteine verschiedene Untersuchungsmethoden eingesetzt werden.

Unter Zugrundelegung der stratigraphischen bzw. petrographischen Zuordnungen der Gesteine erfolgt eine strukturgeologische Interpretation der Beobachtungen. Zwecks Bewertung der Barriereigenschaften der Gesteine werden alle Beobachtungen zu ihrer tektonischen Überprägung und zur Alteration sowie zur Ausbildung des Porenraumes erfasst und ggf. durch ergänzende Analysen (z. B. Röntgendiffraktometrie, RFA-Analysen und Durchlichtmikroskopie) genauer spezifiziert.

Abgesehen von den geologischen Kartierungen während des Schachtabteufens und von den Kartierungsarbeiten in den Strecken und Querschlägen sowie in Infrastruktureinheiten des URL bzw. des Erkundungsbergwerkes erfolgt die Erkundung des nahen und fernen wirtsgesteinsinternen Umfeldes des geplanten HAW-Endlagers durch Bohrungen und

geophysikalische Messungen. Die Bohrungen werden aus Strecken, speziellen Bohrorten oder Infrastrukturräumen gebohrt und haben meist nur geringe Längen von 10 bis 40 m. Bei Vorhandensein spezieller Bohrtechnik sind untertage auch Erkundungsbohrungen mit Längen von bis zu mehreren hundert Metern möglich. So z. B. wurden bei der untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben zur Prognose des geologischen Aufbaus der Flankenbereiche der vorgesehenen Einlagerungsfelder bis zu 250 m lange Erkundungsbohrungen gestoßen (siehe Kap. 3.2.2.1).

Zusätzlich zu den geologischen Erkundungsbohrungen, die z. T. auch von den Schächten ausgehen, werden bei der untertägigen Erkundung zahlreiche Bohrungen für wissenschaftliche Versuche, zur Installation von Messtechnik, zur Streckenplanung oder zur gezielten Beprobung der Wirtsgesteinsformation gestoßen. Durchmesser und Länge der Bohrungen werden den Versuchen oder der Versuchstechnik angepasst. Standarddurchmesser liegen zwischen 52 mm und 101 mm, Standardlängen zwischen 3 m und 30 m. In Tongesteinen und Salzformationen werden die Bohrungen überwiegend trocken gebohrt, vereinzelt mit Öl. Ein Teil der Bohrungen wird gekernt und/oder geophysikalisch vermessen, wobei die dabei eingesetzten Bohrlochmessverfahren vom Wirtsgesteinstyp abhängen (siehe Kap. 3.2.2).

Auf der Grundlage der Ergebnisse der geologischen Aufnahme der Erkundungsbohrungen und der Kartierung der Erkundungsstrecken werden geologische Übersichtskarten und geologische Schnitte angefertigt. Basierend auf einer komplexen und integralen Interpretation aller Erkundungsergebnisse wird ein geologisches 3D-Standortmodell erarbeitet. Dieses Modell wird bei Vorlage neuer Erkundungsdaten fortlaufend aktualisiert bzw. präzisiert. Es dient als Grundlage für die Bergwerksplanung und die Planung der Vorfelder erkundung sowie für die Auswertung und Interpretation der geologisch-geophysikalischen und geotechnischen Erkundungsergebnisse. Außerdem bildet das geologische Lagerstättenmodell die Basis für erkundungsbegleitende (z. B. Abstandsfestlegung zu ungeeigneten Gesteinspartien) oder nachfolgende numerische Modellierungen.

Geophysikalische Untersuchungsverfahren werden bei der untertägigen Standorterkundung vor allem für Messungen zum Nachweis und zur Charakterisierung von Auflockerungs- bzw. Störungszonen und von kleinräumigen Inhomogenitäten im Nahfeld des geplanten Endlagers sowie zur In-situ-Bestimmung von Gesteinseigenschaften eingesetzt (Abb. 49). Hierfür werden vor allem Bohrlochverfahren verwendet. Zur Charakterisierung von auffahrungsnahen Störungs- und Klüftzonen werden in salinaren und kristallinen Gesteinen häufig seismische Messungen in einer Bohrung oder als Tomographie zwischen zwei Bohrungen (Quell- und Empfängerbohrung) durchgeführt. Der Abstand zwischen den Bohrungen richtet sich nach der Gesteinsart und der Aufgabenstellung. Er variiert zwischen 1 m und mehreren 10er Metern. In Tonsteinen sind seismische tomographische

Messungen aufgrund intensiver Dämpfungseffekte nur sehr kleinräumig möglich. Außerdem erfahren mikroseismische Untersuchungsverfahren, häufig in Kombination mit geoelektrischen bzw. elektromagnetischen Messungen, eine intensive Nutzung bei der Charakterisierung der Auflockerungszone (EDZ) im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen (Abb. 50).



Abb. 49: Durchführung bohrlochseismischer Messungen im Untertagelabor Mont Terri (Quelle: BGR)

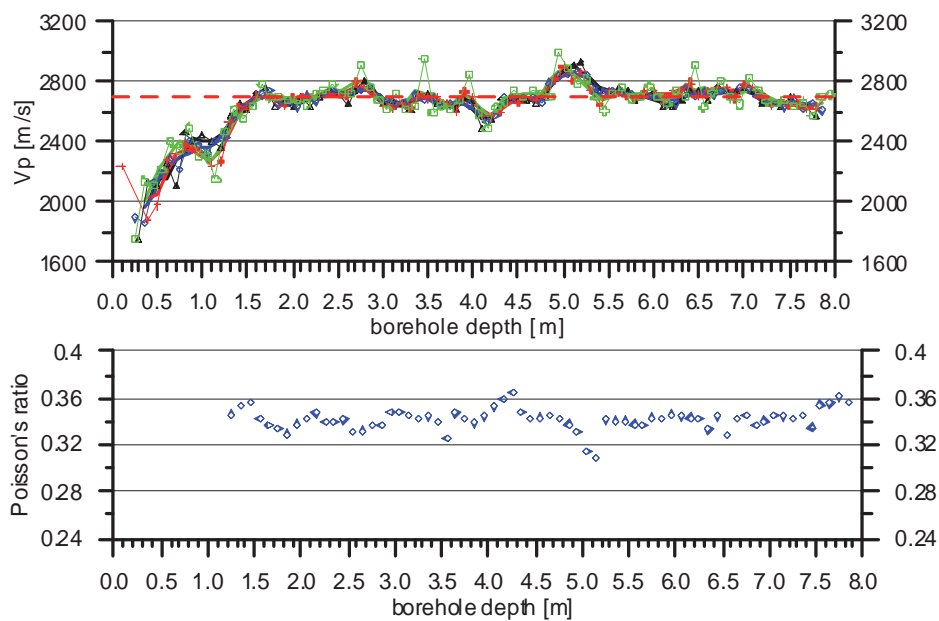


Abb. 50: Veränderung der mittels Ultraschall-Bohrlochseismik gemessenen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (oben) und des Poisson's ratios (unten) im Umfeld einer Strecke im Wirtsgestein Ton (Quelle: BGR)

Bei der untertägigen Erkundung von Salzlagerstätten stellen elektromagnetische Impulsreflexionsverfahren (EMR-Messungen) eine wichtige Methode zur Vorfelderkundung der geologischen Strukturen dar. Die per EMR nachgewiesenen Reflektoren sind äußerst nützliche Hilfsmittel zur Konstruktion des Internbaus komplexer Salzstrukturen (Abb. 51). In Tongesteinen kann das Verfahren aufgrund der hohen Dämpfung nicht eingesetzt werden.

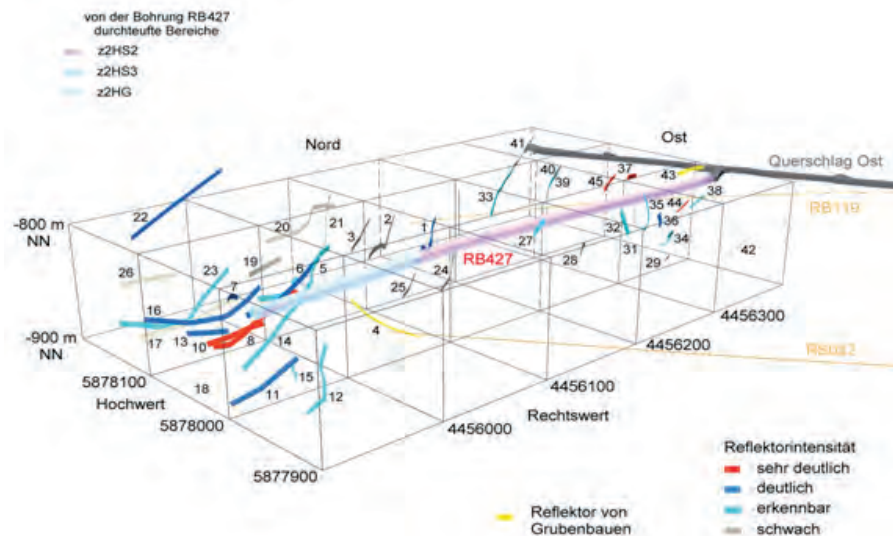


Abb. 51: Beispiel für die Anwendung von EMR-Messungen im Wirtsgestein Salz zum Nachweis von lithologischen Grenzflächen und Grubenbauten (Quelle: BGR)

Das Prinzip der EMR- bzw. Radarmessungen beruht darauf, dass von einer Senderantenne elektromagnetische Wellen in das Gebirge ausgesendet werden. Das verwendete Frequenzspektrum bewegt sich zwischen 10 - 1000 MHz. Die Wellen durchdringen das umgebende Medium in Abhängigkeit von dessen elektromagnetischen Eigenschaften. Unterschiede in den dielektrischen Eigenschaften führen zu Reflexionen eines Teils der Wellenenergie und diese werden anschließend von einer Empfangsantenne registriert. Die Leitfähigkeit des Mediums begrenzt die Eindringtiefe. Hohe Frequenzen werden stärker gedämpft, haben aber eine höhere Auflösung. Aus der Geometrie der Antennenanordnung, der gemessenen Laufzeit der Reflexionen, der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals und den Messpositionen der Antennen lassen sich Reflexionshorizonte rekonstruieren.

Zur Untersuchung der hydraulischen Integrität des Salzgebirges und der mechanischen Stabilität von untertägigen Hohlräumen werden häufig mikroakustische Messungen eingesetzt. Durch die Erfassung von hochfrequenter seismischer Energie kann Mikrorissbildung direkt nachgewiesen und geortet werden (Abb. 52). Statistische

Analysen von Mikroriss-Clustern erlauben eine Identifikation bzw. Lokalisierung von gebirgsmechanisch möglicherweise bedeutenden makroskopischen Rissbildungen. Dadurch können Auflockerungszonen im Umfeld von Abbauen und an Schichtgrenzen nachgewiesen werden (KAISER et al. 2007). Weitere Anwendungsmöglichkeiten für mikroakustische Messungen sind Beobachtungen der Gebirgsbelastung während der Verfüllung von Hohlräumen, z. B. aufgrund der Erwärmung bei der Verfüllung mit Salzbeton, sowie der Nachweis der Wirksamkeit von Verfüllmaßnahmen anhand der Reduzierung der Rissbildungen im Gebirge.

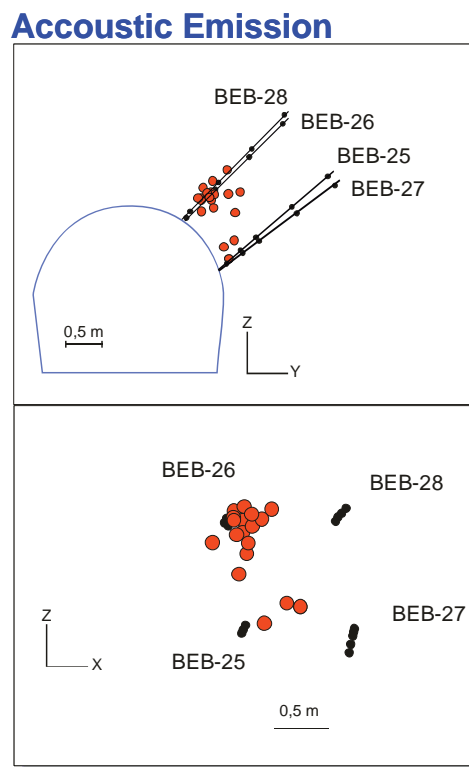


Abb. 52: Beispiel für die Anwendung mikroakustischer Messungen zur Lokalisierung von Mikroriss-Bildungsprozessen im Umfeld einer Strecke im Wirtsgestein Salz (rote Punkte – registrierte akustische Signale, schwarze Punkte – Position der Messeinrichtungen in den Bohrungen; Quelle: BGR)

Im Rahmen der untertägigen Erkundung werden darüber hinaus zahlreiche geophysikalische Standardmessverfahren vor allem als Bohrlochmessungen eingesetzt, die Daten zur Lithologie und zu den physikalischen Gesteinseigenschaften liefern. Übersichten zu den einsetzbaren Untersuchungsverfahren sind u. a. in FRICKE & SCHÖN (1999), KNÖDEL et al. (2005), BERCKHEMER (1990), MILITZER et al. (1986) und BENDER (1985) enthalten.

3.2.1.2 Hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsverfahren

Untertägige hydrogeologische Untersuchungen dienen zum Nachweis der hydraulischen Integrität der geologischen Barriere im Nahfeld des Endlagers und, in Kombination mit den diesbezüglichen Angaben für das Deck- und Nebengebirge, für die Erarbeitung des hydrogeologischen Grundwasserfließmodells für den betrachteten Standort. Dafür muss das für die HAW-Einlagerung vorgesehene Wirtsgestein hinsichtlich seines strukturellen Baus und seiner hydraulischen Eigenschaften detailliert untertägig charakterisiert werden. Anwendungsbeispiele für die untertägige hydrogeologische Standorterkundung sind in KLINGE et al. (2007) und BRÄUER et al. (in Vorb.) für Salzgesteine, in ANDRA (2005c), NAGRA (2002a,) und BOSSART et al. (2008) für Tonstein sowie in NAGRA (1999) und SKB (2007, 2008) für Kristallin dargestellt. Die Methodik hydrogeologischer Messungen wird u. a. in HÖLTING & CALDEWEY (2005), LANGGUTH & VOIGT (2004) sowie SCHREINER & KREYSING (1998) beschrieben.

Für die Beurteilung der hydraulischen Barrierefunktion des geologischen Nahfeldes eines Endlagers ist die exakte Lokalisierung und Charakterisierung möglicher Transportwege für Radionuklide sowie die Bestimmung der Transportmechanismen und -eigenschaften des Gebirges bzw. der Gesteine unbedingt erforderlich. Im Mittelpunkt des Interesses stehen dabei:

- Untersuchungen zur lateralen und vertikalen Variabilität der hydraulischen Gebirgs- und Gesteinseigenschaften sowie zu hydraulischen Verbindungen zwischen unterschiedlichen Aquiferen,
- Studien zum Nachweis hydraulisch aktiver Störungszonen,
- Analysen der Transport- und Rückhaltemechanismen für Radionuklide in porösen Medien und/oder Kluftsystemen (Studien zu Advektion, Diffusion, Sorption, Retention, etc.),
- Lokalisierung und detaillierte Charakterisierung möglicher Transportwege für Radionuklide (3D-Geometrie der Grundwasserleiter, Porenraum, Kluftnetzwerk, Einfluss des Endlagerbaus auf die Integrität des Gebirges) sowie
- Untersuchung der Einflussfaktoren auf die hydrogeologischen Verhältnisse im unmittelbaren Umfeld des Endlagers (Einfluss der Gesteinsfazies, Heterogenität der hydrogeologischen Einheiten, Anisotropie der hydraulischen Eigenschaften, Kluft- und Störungssysteme, Porenwasserdruck, hydraulische Gradienten).

Erste Untersuchungen der hydrogeologischen Verhältnisse im Wirtsgestein sowie in den Schichten des Deck- und Nebengebirges und in den unterlagernden Schichten erfolgen bereits in Tiefbohrungen im Rahmen der übertägigen Standorterkundung. In Ergänzung dazu werden bei der untertägigen Standorterkundung spezielle hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Wirtsgestein selbst durchgeführt. Die Untersuchungsziele und eingesetzten Methoden werden durch die wirtsgesteinsspezifischen Gebirgseigenschaften bestimmt.

Im Mittelpunkt der Arbeiten stehen neben der Abgrenzung möglicher Migrationswege unter Zugrundelegung des geologischen Standortmodells und der geochemischen Lösungsbefunde vor allem In-situ-Untersuchungen der Gebirgsdurchlässigkeiten. Zur In-situ-Bestimmung der Permeabilitäten werden je nach Gesteinstyp und konkreter Aufgabenstellung unterschiedliche Arten hydraulischer Bohrlochtests angewendet. Die Untersuchungen werden häufig mit speziell entwickelten Messsystemen durchgeführt, die der jeweiligen Fragestellung bzw. den spezifischen Eigenschaften der Wirtsgesteine angepasst wurden. Gebräuchliche Messsysteme wurden z. B. von der Fa. Solexperts, der BGR und der GRS mbH (Minipacker) entwickelt. Die Systeme unterscheiden sich weniger in ihrer Funktionsweise, als vor allem in ihrem Durchmesser (z. B. unterschiedliche Bohrungsdurchmesser in verschiedenen Ländern). Weitere Unterschiede finden sich in der Durchführung der Messungen, z. B. in der Länge und Anordnung der Messintervalle. Im Tonstein liegt der Untersuchungsschwerpunkt im Nahbereich der Strecken (bis ca. doppelter Streckendurchmesser), entsprechend werden die Messungen in kurzen Abständen mit kleinen Messintervallen durchgeführt (Abb. 53 und 54). Außerdem kommen in tonigen Wirtsgesteinen bei der Charakterisierung der Durchlässigkeit der Auflockerungszonen neben Messungen in einem Bohrloch auch hydraulische Crosshole-Tests zur Anwendung.



Abb. 53: Durchführung von Permeabilitätsmessungen im Untertagelabor Mont Terri (Quelle: BGR)

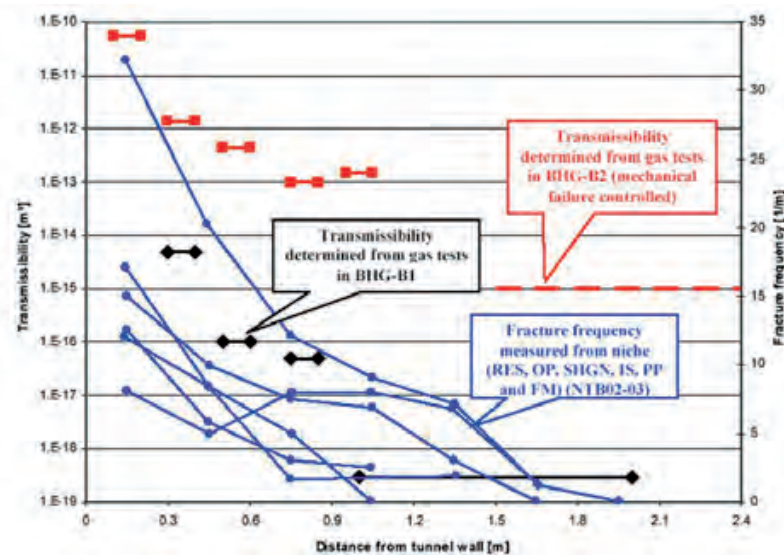


Abb. 54: Veränderung der mittels Permeabilitätstest gemessenen Transmissivitäten im Umfeld einer Streckenauffahrung. Deutlich zu sehen ist die Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit bzw. Transmissivität des tonigen Gesteins bei zunehmender Entfernung von der Hohlraumkontur (Quelle: BGR)

Bei der hydrogeologischen Charakterisierung der Wirtsgesteine kommen überwiegend die folgenden Untersuchungsmethoden bzw. Tests zum Einsatz:

- Pumpversuche zur Bestimmung der wasserleitenden und wasserspeichernden Eigenschaften eines Aquifers (Transmissivität, Speicherkoeffizient) und zur hydrochemischen Probenahme,

- Wasserdruckversuche (im standfesten Gebirge) zwecks Analyse der Wasseraufnahmefähigkeit und Durchflussrate ($2 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-8}$ m/s),
- Fluid-Logging (Porengrundwasserleiter, Kluftwasserleiter) zur Bestimmung von Kluftwasserzutritten und der hydraulischen Durchlässigkeit,
- Slug-Test (Bestimmung der Transmissivität eines Aquifers, wobei T zwischen 10^{-3} und 10^{-7} m²/s schwankt),
- Injektions- bzw. Pulse-Tests zur Bestimmung sehr niedriger Durchlässigkeitsbeiwerte,
- Tracerversuche (z. B. Flüssigtracer: Salzwasser, diverse Standardtracer, radioaktive Tracer, Gase) sowie
- Langzeitdiffusionsversuche.

Das gemeinsame Prinzip der verschiedenen Testmethoden besteht darin, ein Fluid (Flüssigkeit oder Gas) bekannter Viskosität und Kompressibilität in den Poren- bzw. Kluftraum der zu testenden Wirtsgesteinsformation zu verpressen oder aus ihm zu entnehmen (Abb. 55). Analysiert wird der Zusammenhang zwischen der Änderung der Fließrate und dem zeitlichen Druckverlauf. Das Testfluid und die Art des Bohrlochtests müssen in Abhängigkeit von den jeweils vorliegenden Standortrandbedingungen und der jeweiligen Fragestellung ausgewählt werden. Für Tests in aufgelockerten Bereichen ist auch bei Annahme einer partiellen Flüssigkeitssättigung Gas als Testfluid geeignet. Da für Salzgesteine und kristalline Gesteine keine Restriktionen wegen etwaiger Wechselwirkungen mit der Gesteinsmatrix bestehen, kann Pressluft verwendet werden. In Tonsteinen wird häufig Stickstoff verwendet.

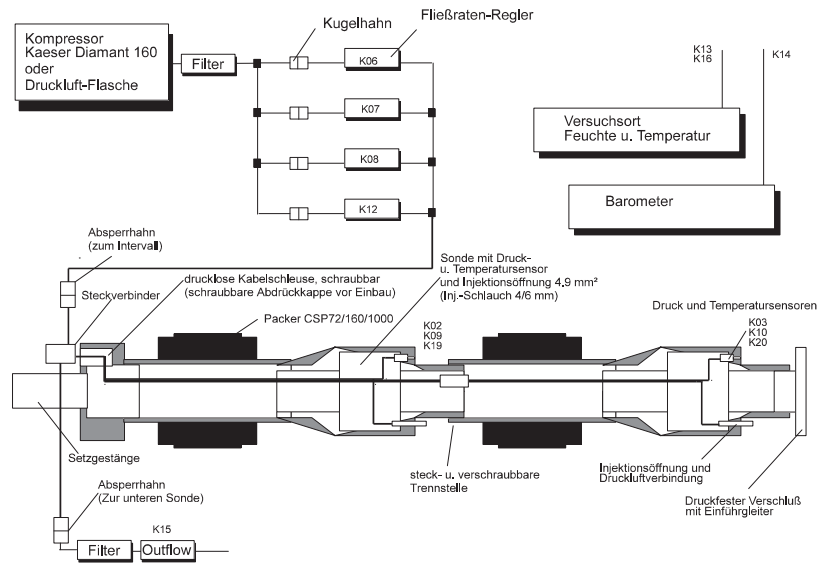


Abb. 55: Schematischer Aufbau eines Doppelpackers, der zur Abtrennung des Untersuchungs-bereiches und zum Verpressen des Testfluids genutzt wird. Die Angaben K1 etc. bezeichnen die Kanalnummer für die Speicherung des jeweiligen Parameters

Die Auswahl der anzuwendenden Bohrlochtests richtet sich vor allem nach den hydraulischen Durchlässigkeiten der zu analysierenden Gesteinsformationen. Pumpversuche, Wasserdruck-Tests oder Slugtests, d. h. Auffüllversuche, sind vorwiegend für die Bestimmung mittlerer Gebirgsdurchlässigkeiten geeignet (bis minimal 10^{-9} m/s). Injektions- bzw. Pulse-Tests (Abb. 56) und Entnahmetests mit konstanter Rate (Constant Rate Test, Abb. 57) lassen die Bestimmung deutlich niedrigerer Durchlässigkeitsbeiwerte (bis minimal 10^{-11} m/s) zu.

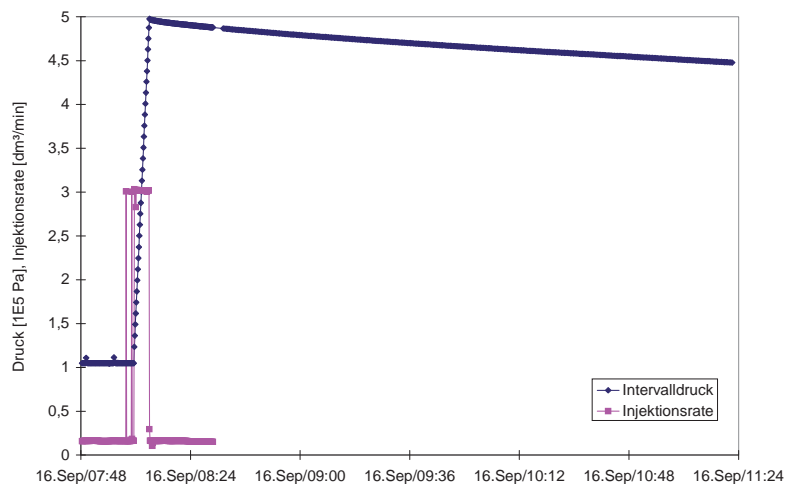


Abb. 56: Zeitlicher Verlauf von Injektionsrate (magenta) und Wasserdruck im Bereich des Testhorizontes (blau) im Verlaufe eines Pulse-Tests

Damit aus einem Constant Rate Test die Formationspermeabilität bestimmt werden kann, muss die Testdauer eine bestimmte Mindestdauer übersteigen. Diese Mindestdauer ist der Formationspermeabilität umgekehrt proportional. Deshalb lässt sich in Abhängigkeit von den Testparametern eine Grenzpermeabilität angeben, die innerhalb einer vorgegebenen Testdauer mittels eines Constant Rate Tests noch bestimmbar ist. Um sowohl den Vorteil der kürzeren Testdauer bei Pulse-Tests als auch die erhöhte Aussagekraft von Constant Rate Tests nutzen zu können, werden oftmals beide Testarten kombiniert. Mit einem Pulse-Test wird häufig zunächst die Permeabilität grob bestimmt und auf dieser Grundlage entschieden, ob ein Constant Rate Test durchführbar ist oder der Pulse-Test für eine verfeinerte Auswertung fortgesetzt wird.

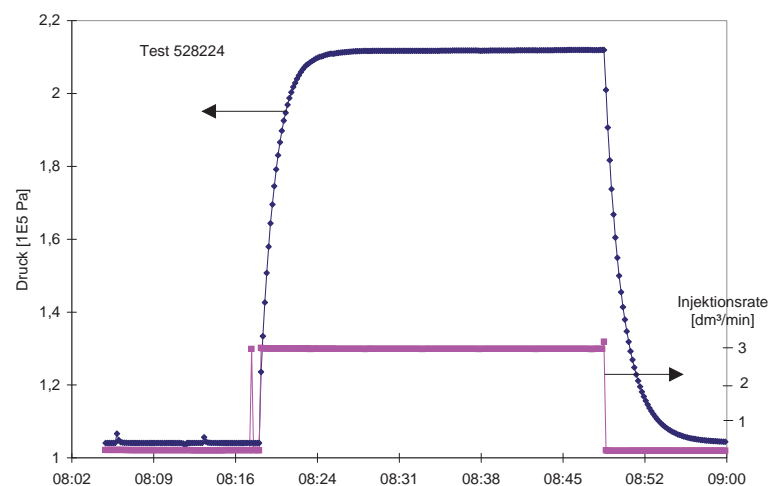


Abb. 57: Beispiel für die Durchführung eines Constant Rate Tests. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf von Injektionsrate (magenta) und Wasserdruck (blau)

In gering durchlässigen Wirtsgesteinen kommen überwiegend Packertests in Bohrungen zur Anwendung, wobei Messsysteme für unterschiedliche Fragestellungen und Bohrungsgrößen existieren. Der Einsatzbereich reicht von kurzen, nur wenige Meter langen Bohrungen bis zu Bohrungen, die mehrere hundert Meter lang sein können. Eingesetzt werden Einfachpacker zur Untersuchung größerer Bohrungsgebiete (Pumpversuche gegen die Bohrlochsohle) sowie Doppel- und Mehrfachpackersysteme zur Abgrenzung definierter Messbereiche (10 cm bis mehrere Meter, vor allem im Streckennahbereich oder zur Abgrenzung von Klufsystemen).

In sehr gering durchlässigen Gesteinen werden je nach Durchlässigkeit Pulse-Tests oder Constant Rate Tests, z. T. in Kombination mit Tracerversuchen und Diffusionsexperimenten (radioaktive Tracer, Gase) eingesetzt. Versuche in gering durchlässigen Gesteinen erfolgen überwiegend mit Gas (Stickstoff, Luft). Wasser wird im Allgemeinen weder im Salz noch im Tonstein eingesetzt. Ausnahmen bilden Versuche mit Formationswasser, die vor allem bei Diffusionsversuchen im Tonstein durchgeführt werden und Versuche mit gesättigter Lauge bei Untersuchungen im Salzgestein.

In Bereichen mit erhöhter Durchlässigkeit, z. B. in der Auflockerungszone im Umfeld von Auffahrungen, werden meist Constant Rate Tests und ggf. Pumptests durchgeführt.

Neben den genannten Methoden werden in den URL's weitere hydrogeologische Spezialuntersuchungen durchgeführt. Dazu zählen:

- Ventilationstests (Analyse des Porenwasserflusses, Bestimmung der Auf-/Entsättigung des Gebirges durch Bewitterung und Makropermeabilität),
- Diffusionstests sowie
- Nachweis und Charakterisierung von Fließwegen, z. B. durch Injektion von Kunstharz (Visualisierung der Geometrie von Fließwegen in sehr kleinen Maßstäben, Analyse des Porenraumes und Lokalisierung von Mikrorissen).

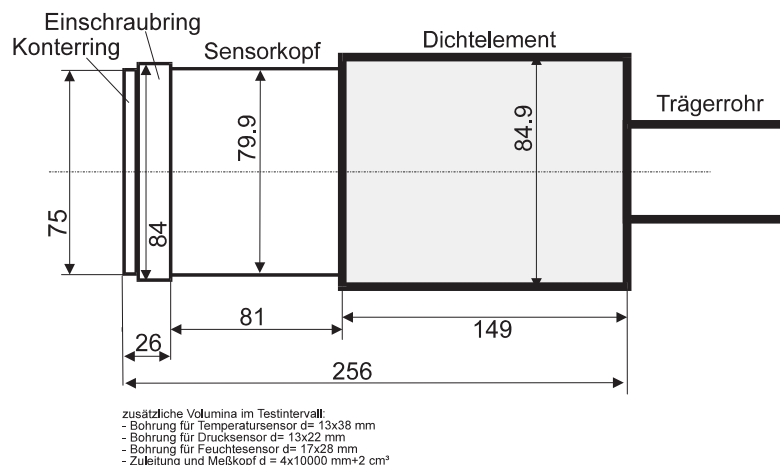


Abb. 58: Aufbau der Testausrüstung für hydraulische Packertests in Kurzbohrungen

Außerdem wurden für spezielle Fragestellungen folgende Messsysteme entwickelt:

- Kurzintervallpacker (Messungen in kleinen Messintervallen bzw. Messfenstern, in Klüften sowie im Streckennahbereich, Abb. 58),
- Schlitzpacker (Entwicklung der BGR zur Messung der Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit, insbesondere wichtig in tonigen Wirtsgesteinen) sowie
- Oberflächenpacker (Entwicklung der BGR für Messungen an der Aufschlussoberfläche, z. B. zur hydraulischen Charakterisierung von Auflockerungszone; entwickelt im Rahmen des FEBEX-Projektes).

Für Porenwasserdruckmessungen werden spezielle Minipacker (GRS mini-packer system, GEXTER mini-packer system; KULL et al. 2007) in sehr kleinen Bohrungen eingesetzt, um im ungestörten Gebirge mittels Piezometer den Porenwasserdruck sowie den Einfluss von Bewetterung und Streckenauffahrung auf den Porenwasserdruck zu untersuchen.

In Tabelle 4 ist eine Übersicht der im Felslabor Mont Terri durchgeführten Experimente zur hydrogeologischen Standortcharakterisierung zusammengestellt.

Tab. 4: Übersicht der hydrogeologischen Experimente im Felslabor Mont Terri (BOSSART & THURY 2008)

Hydrogeology experiments		96	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	07
Abbr.	Title of experiment	Phases 1&2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7	Phase 8	Phase 9	Phase 10	Phase 11	Phase 12	
BF	Borehole fluid effects	AN	A	A									
DB	Deep borehole simulation		N	N									
ED-A	EDZ hydraulic and pneumatic testing	ABENO	AN	AN									
FM-A	Flow mechanism (fluid logging)	AJNS											
FM-B	Flow mechanism (visualisation of low path)	AEJN											
FM-D	Evaporation logging		AJ	AJ	J	J	F	F	F	F			T
GP	Hydraulic and gas permeability	ANS	ANS	ANS	AS								
GP-A	Hydraulic and gas permeability				N								
GP-B	Gas and water coupled processes						BN	BN					
HA	Hydrogeologic analyses				ABINO	BINO	BINO	BINO	BINO	BINO	BINO	BINO	BINO
HG-C	Long-term gas migration												GN
LP	Long-term monitoring porewater pressures												ANT
OP	Osmotic pressure	ANS	AINS	AINS	AINS	INS	INS	INS					
PP	Porewater pressure	A	A										
UZ	Unsaturated zone	AN		N	N	N							
VE	Ventilation test						EGIN	EGIN	EGIN	EGIN	BEGIN	BEGIN	

A: ANDRA, B: BGR, E: ENRESA, F: FOWG, G: GRS, I: IRSN, J: JAEA, N: NAGRA, O: OBAYASHI, S: SCK•CEN, T: swisstopo

Neben den genannten In-situ-Untersuchungen werden im Labor hydrogeologisch relevante Gesteinseigenschaften bestimmt. Dazu zählen z. B.:

- Porosität,
- effektive Porosität,
- wassergesättigte Porosität,
- Porenvolumen,
- Kornverteilung,
- Speicherkoeffizient,
- Wassergehalt,
- Gesteinsdichte,
- hydraulische Durchlässigkeit (abgeschätzt auf Grundlage von Korngrößenanalysen),
- Durchlässigkeitsbeiwert (gemessen unter Laborbedingungen) sowie
- Diffusions- und Sorptionseigenschaften.

Außerdem werden mittels spezieller Laborexperimente die Diffusions- und Sorptionseigenschaften der Wirtsgesteine und der Gesteine des Fernfeldes analysiert, unter Berücksichtigung eventuell ablaufender biogeochemischer Reaktionen und des radioaktiven Zerfalls. Zusätzlich erfolgen spezielle Untersuchungen zum Einfluss geochemischer Prozesse (z. B. Gasbildung durch Korrosion) auf das Grundwassermilieu und die Gesteine im Endlagerniveau.

Ergänzend zu den genannten hydrogeologischen Untersuchungen erfolgen Analysen der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung von Formationswässern, Kluftwässern bzw. Tiefenwässern sowie Bestimmungen der Temperatur, elektrischen Leitfähigkeit, des pH-Wertes und der Dichte der Lösungen. Die chemische Beschaffenheit und die Isotopenzusammensetzung der gelösten Komponenten eines Grundwassers sind abhängig von dessen Herkunft, von den Infiltrationsbedingungen, den Wechselwirkungen mit den durchflossenen Lithologien und möglichen Mischungen mit anderen Grundwassertypen entlang des Fließwegs.

Ziel der z. T. bereits im Verlaufe der übertägigen Standorterkundung (Tiefbohrungen von Übertage) vorgenommenen hydrochemischen und isotopengeochemischen Charakterisierung der Grundwässer ist die Klärung ihrer Herkunft (inklusive Ausschluss bzw. Quantifizierung von Zuflüssen aus dem Deck- und Nebengebirge),

die Bestimmung ihrer Verweilzeit im Untergrund und die Analyse ihrer geochemischen Besonderheiten. Dies erlaubt weitergehende Aussagen über eine mögliche hydraulische Kommunikation zwischen unterschiedlichen Aquiferen, die Eingliederung in die regionalen Grundwasserströmungsverhältnisse sowie die Bestimmung der zeitlichen und chemischen Randbedingungen für mögliche Stofftransporte in Wirts- und Nebengesteinen.

Für Porenwässer ermöglichen die Untersuchungen Aussagen zur dominierenden Art von Stofftransporten in den Wirts- und Rahmengesteinen (diffusiv, advektiv) sowie die Definition von „Referenzwässern“, d.h. Porenwässern, die im potenziellen Einlagerungsbereich vorhanden sind. Diese Erkenntnisse dienen einerseits zur Modellierung von zu erwartenden chemischen Reaktionen der Porenwässer mit dem Verfüllmaterial des geplanten Endlagers. Andererseits sind sie außerordentlich wichtig als Basisdatensatz für die Ableitung von Sorptionswerten im Rahmen der Modellierung des Radionuklidtransports durch die Geosphäre.

Auf der Grundlage der im Ergebnis der über- und untertägigen Erkundung erarbeiteten hydrogeologischen Standortmodelle, der ermittelten Gesteinsparameter und der analysierten Prozesse erfolgen detaillierte hydrogeologische Modellrechnungen. Sie werden zur Auswertung von In-situ-Versuchen, zur Charakterisierung von Fließ- und Transportvorgängen und für die Langzeitsicherheitsanalyse eingesetzt. Für die Modellberechnungen, insbesondere für die Charakterisierung gekoppelter Prozesse (THMC, siehe Kap. 3.2.1.4), werden verschiedene Rechenprogramme und -codes, wie z. B. RockFlow eingesetzt, die ständig weiterentwickelt werden.

3.2.1.3 Geomechanische und thermophysikalische Untersuchungsmethoden

Geomechanische Untersuchungen werden bereits in den von Übertage niedergebrachten Tiefbohrungen, d. h. im Vorfeld detaillierter untertägiger Erkundungsarbeiten für ein HAW-Endlager durchgeführt, da diese Daten frühzeitig für die Planung, die Konzeptentwicklung und die Standortsuche bzw. -auswahl von Bedeutung sind. In frühen Stadien des Standortauswahlprozesses beschränken sich die Arbeiten neben den Tiefbohrungen auf Laboruntersuchungen und In-situ-Versuche in anderen Untertagebauwerken (generische URL, Bergwerke, Tunnel etc.).

Die anschließend untertägig zu realisierenden geomechanischen Untersuchungen dienen zur Ermittlung der standortspezifischen gebirgsmechanischen Materialparameter, zur Messung des primären Gebirgsspannungszustandes und zur Erfassung von Spannungsänderungen sowie zur Analyse des Verformungsverhaltens der Gesteine bzw. des Gebirges im Bereich des geplanten Endlagerbergwerkes. Auf der Grundlage dieser Daten erfolgt der Streckenausbau, die geomechanische Einschätzung der Barriere (z. B. „Selfsealing-Eigenschaften“) sowie der für den Langzeitsicherheitsnachweis erforderliche Nachweis der geomechanischen Stabilität des geplanten Endlagerbergwerkes.

Die geotechnischen In-situ-Messungen werden nicht nur in der Erkundungsphase durchgeführt, sondern häufig als Wiederholungs- bzw. Dauermessstellen in der Betriebsphase fortgeführt, um zeitabhängige Veränderungen zu erfassen. Häufig erfolgt eine automatische Datenregistrierung. Für die Festlegung der Anzahl und die Auswahl der Lokalitäten für die Messstellen werden folgende Kriterien genutzt:

- repräsentative Verteilung im Grubengebäude (räumlich, Gesteintypen),
- an besonders überwachtungswürdigen Lokationen (z. B. in bestimmten Schichteinheiten, wie der Gorleben-Bank im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes Gorleben),
- zur Erfassung bestimmter lokaler Phänomene oder Experimente (z. B. Heater-Versuch) sowie
- auf der Basis geologischer Überlegungen bzw. Vorgaben.

Im Rahmen des untertägigen geomechanischen Untersuchungsprogramms erfolgen:

- Bestimmung felsmechanischer Kennwerte durch z. B. Verformungsmessungen (Konvergenz, Extensometer, Fissurometer, Inklinometer),
- Untersuchungen zum Einfluss geologischer u. a. Faktoren (Lithologie, Fazieswechsel, Heterogenitäten bzw. Anisotropien in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften der Gesteine, Trennflächenorientierung und -häufigkeit, Temperatur) auf das Gebirgsverhalten,
- Analyse der Festigkeitseigenschaften (Druck-, Zug- und Scherfestigkeit) und des Verformungsverhaltens der Gesteine,
- Ermittlung der Gebirgsspannungen,
- numerische Berechnungen zur Prognose des Verformungsverhaltens und zur Spannungsumverteilung bei Einlagerung der Wärme produzierenden Abfälle,
- Bewertungen der Standsicherheit der untertägigen Hohlräume,
- Nachweis von durch den Endlagerbau und -betrieb verursachten Spannungsumlagerungen sowie
- Untersuchungen des Einflusses des Endlagerbergwerkes auf die Barrieren (z. B. Deformationen, Spannungen, Ausmaß und Intensität der EDZ).

Die Kenntnis der primären Gebirgsspannungen ist für die Beurteilung des Verformungs- und Bruchverhaltens des Gebirges und damit der Standfestigkeit von untertägigen Bauwerken von besonderer Bedeutung. Dabei werden nicht nur die primären Gebirgsspannungen, sondern auch die durch die Streckenauffahrung induzierten sekundären Spannungen untersucht. Speziell im Zusammenhang mit der Errichtung des Grubengebäudes und der Einlagerung der Wärme produzierenden Abfälle sind folgende Untersuchungen erforderlich:

- zur Charakterisierung der Auflockerungszone im Streckennahbereich,
- zum Einfluss der Streckenauffahrung auf das Gebirgsverhalten,
- zum Einfluss der Bewetterung und von Temperaturschwankungen sowie
- zur Minimierung der Auflockerungszone durch angepasste Auffahrungsmethoden.

Darüber hinaus liefern Laborversuche zu den mechanischen und dynamischen Gesteinseigenschaften wichtige Daten, die als Eingangsparemeter Grundlage für die Erstellung und Validierung von geomechanischen Modellen sowie für numerische Berechnungen im Rahmen von Standsicherheitsbewertungen, Integritätsnachweisen und Langzeitsicherheitsanalysen sind. Die Charakterisierung des Deformationsverhaltens umfasst neben der Bestimmung der petrophysikalischen Gesteinsparameter auch die Herleitung der geomechanischen Materialgesetze für das Kurz- und Langzeitverhalten der Wirtsgesteine. Hierzu zählen insbesondere das Kompaktionsverhalten, die Spannungs-Deformations-Beziehungen sowie die Beschreibung der erwarteten Bruchmechanismen als Funktion des Spannungszustands.

Häufig handelt es sich bei den Messsystemen um Spezialentwicklungen, die nur von einer einzigen oder wenigen Firmen hergestellt werden, da nur ein geringer Bedarf für diese Messinstrumente besteht. Um eine hohe Qualität und Reproduzierbarkeit der Messdaten zu gewährleisten, erfolgt eine Zertifizierung der Methoden und Geräte. Soweit möglich werden dabei Iso- und DIN-Normen berücksichtigt, was sich aber nicht für alle eingesetzten Methoden durchführen lässt. In allgemeiner Form werden die geomechanischen Untersuchungsmethoden in PRICE (2008), PRINZ & STRAUSS (2006), GENSKE (2006) und BENDER (1984) beschrieben.

Die wichtigsten geomechanischen In-situ-Messungen sind die Ermittlung der Gebirgsspannungen bzw. von Spannungsänderungen sowie die Bestimmung von Gebirgsverformungen. Messungen des Gebirgsspannungszustandes beruhen auf Kurzzeitmessungen von Gebirgs- bzw. Bohrlochentlastungen nach der Überbohrmethode (Abb. 59) oder auf Kurzzeitmessungen nach der Hydrofrac-Methode (FECKER & REICK 1996). Die Ermittlung langfristiger Gebirgsspannungsänderungen, hervorgerufen

z. B. durch Temperaturschwankungen, Neuauffahrungen oder tektonische bzw. geodynamische Prozesse im Umfeld des Endlagerbergwerkes, erfolgt durch stationäre Spannungsmonitormesseinrichtungen. Weit verbreitet sind Spannungsmonitorstationen der Firma Glötzl, die mit 4 Spannungsgebern unterschiedlicher Orientierung ausgestattet sind und in Bohrungen positioniert werden (siehe BRÄUER et al. in Vorb.).



Abb. 59: Unter-Tage-Photo zur Durchführung eines Überbohrversuches im URL Mont Terri (Quelle: BGR)

Die Ermittlung der primären Gebirgsspannungen mittels Überbohrversuchen erfolgt häufig mit der BGR-Überbohrmethode oder mittels CSIRO-Sonde (FECKER & REIK 1996). Das Prinzip der Überbohrversuche ist in Abb. 60 dargestellt. Dabei werden mittels einer speziellen Messsonde die Durchmesseränderungen des Pilotbohrlochs infolge der Entspannung durch das Überbohren gemessen. Die Erfassung der Durchmesseränderungen erfolgt durch 4 jeweils um 45 ° versetzt angeordnete Wegaufnehmer. Aus den gemessenen Verformungen werden mit Hilfe der geomechanischen Gesteinsparameter und unter Berücksichtigung der Hohlraumgeometrie die Gebirgsspannungen berechnet.

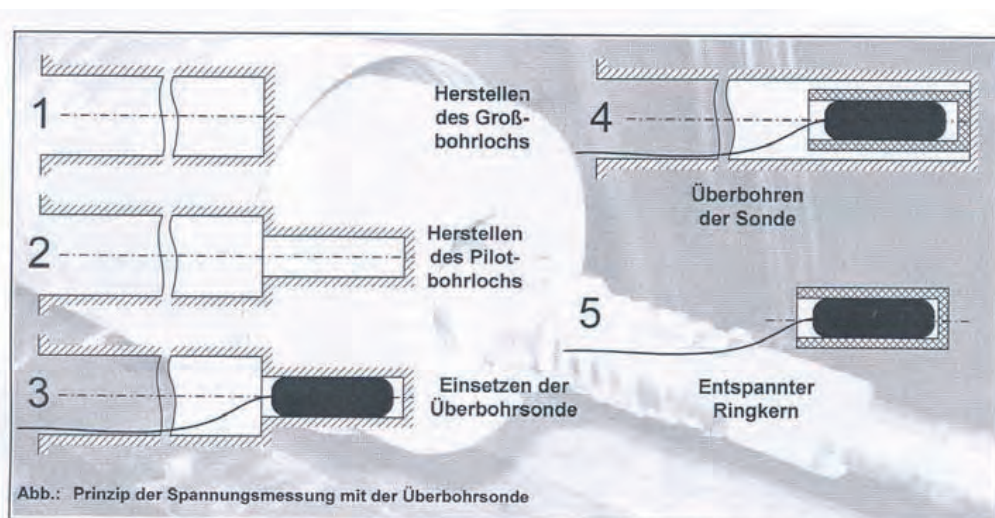


Abb. 60: Prinzip der Überbohrversuche nach der BGR-Methode (Bräuer et al. in Vorb.)

Mit der Hydraulic-fracturing-Methode (Hydrofrac-Methode) wird durch hydraulisch induziertes Aufreißen des Gebirges das Gebirgsspannungsfeld ermittelt. Dazu wird der Untersuchungsabschnitt mittels Doppelpackersystem abgedichtet und zwischen den Packern wird Flüssigkeit oder Gas verpresst. Bei Steigerung des Injektionsdruckes kommt es nach Überschreiten der Gebirgsspannung und der Gesteinszugfestigkeit zur Rissbildung. Der sog. „Ruhedruck“ bzw. „Rissöffnungsdruck“, d. h. der Druck bei dem der Riss gerade noch offen gehalten wird, entspricht der minimalen Hauptspannung. Die Normalenrichtung der Rissfläche gibt die Orientierung der minimalen Hauptspannung wieder. Die räumliche Lage der Hauptspannungsrichtung kann auch anhand der Richtung von Bohrlochrandausbrüchen bestimmt oder aus der Deformation vertikaler Auffahrungen (z. B. Rolllöcher) abgeleitet werden (LAVEROV et al. 2008).

Spannungsänderungen im Gebirge sowie zwischen Ausbau und Gebirge werden auch mit Langzeitmessungen nach der Kompensationsmethode bestimmt. Hierfür werden verschiedene hydraulische Druckkissen eingesetzt. Im Salzgestein werden diese Langzeitmessungen auch zur Ermittlung der Absolutspannungen bzw. zur Abschätzung des Primärspannungszustandes eingesetzt. Die Messungen erfolgen mit stationären Spannungsmonitorstationen in Bohrungen und mit Druckkissen im Rahmen von Schlitzentlastungsversuchen.

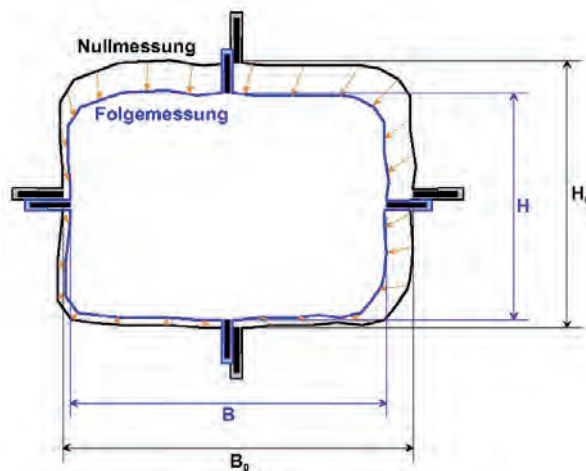
Um das elastische Verformungsverhalten des Gebirges (E-Modul) und den Einfluss des Gefüges auf das geomechanische Verhalten des Gebirges zu analysieren, erfolgen Bestimmungen des Last-Deformations-Verhaltens mittels Dilatometerversuch. Mit unterschiedlichen Laststufen (in Gorleben wurden Laststufen von 5 MPa, 10 MPa und 15 MPa verwendet) werden Bohrlochaufweitungsversuche, z. B. mittels BGR-Dilatometer MK III (PAHL & HEUSERMANN 1991), gefahren, um aus den Last-Deformations-Kurven die Elastizitätsmodule unter In-situ-Bedingungen zu messen. Ergänzt werden diese Arbeiten durch Großpfeilerversuche, bei denen die Übertragbarkeit von Laborergebnissen zum Last-Deformations-Verhalten (z. B. Kriechen im Salz) auf die In-situ-Verhältnisse untersucht wird.

Aus Umlagerungsprozessen im Gebirge, die durch die Auffahrung von Grubenräumen sowie durch den Betrieb des Erkundungs- bzw. Endlagerbergwerkes hervorgerufen werden, resultieren sowohl großräumige als auch lokal begrenzte Gebirgsdeformationen, die mit Verformungsmessungen erfasst werden. Hierfür werden die folgenden Messverfahren eingesetzt:

- Konvergenzmessungen,
- Extensometermessungen,
- Inklinometermessungen sowie
- Fissurometermessungen.

Um großräumige Verformungen zu erfassen, werden ergänzend auch optische Methoden zum Tunnelscanning und Nivellierungsmessungen eingesetzt.

Konvergenzmessungen dienen zur Erfassung der Veränderungen der Hohlraumkontur. Dafür werden Abstandsänderungen zwischen Messpunkten ermittelt, die mit Kurzankern dauerhaft fixiert wurden. Verlängert sich durch die Verformungsprozesse eine Messstrecke, so wird dies als Divergenz bezeichnet. Verkürzungen von Messstrecken stellen Konvergenzen dar. Abb. 61 vermittelt einen Eindruck über das Prinzip und die Auswertung von Konvergenzmessungen.



Längenänderungen:

$$\Delta H = H - H_0$$

$$\Delta B = B - B_0$$

Konvergenz : $\Delta H < 0$ bzw. $\Delta B < 0$

Divergenz : $\Delta H > 0$ bzw. $\Delta B > 0$

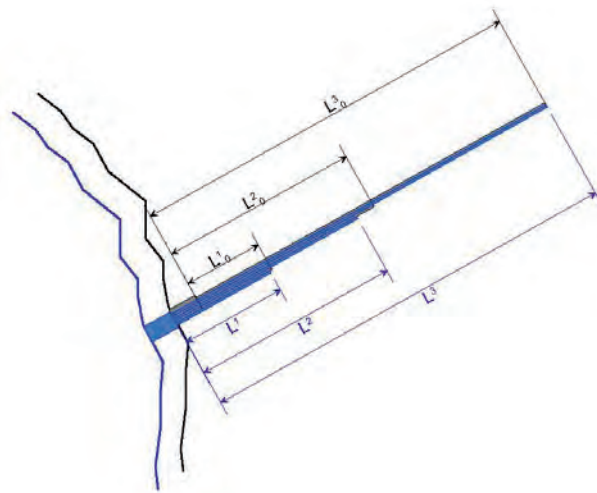
Verformungen:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H - H_0}{H_0}$$

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta B}{B_0} = \frac{B - B_0}{B_0}$$

Abb. 61: Prinzipskizze zu Konvergenzmessungen in einer Strecke und zu ihrer Auswertung (BRÄUER et al. in Vorb.)

Extensometer-Messungen erfassen Abstandsänderungen von Messpunkten, die entlang einer gemeinsamen Achse (meist einer Bohrlochachse) angeordnet sind. Extensometer-Messpunkte sind i.d.R. an Glasfiderstangen an vorher definierten Stellen in Bohrlöchern angebracht (Abb. 62).



Längenänderungen:

$$\Delta L^i = L^i - L_0$$

Verformungen:

$$\epsilon^i = \frac{\Delta L^i}{L_0} = \frac{L^i - L_0}{L_0}$$

Abschnittsverformungen:

$$\epsilon_a^i = \frac{\Delta L^i - \Delta L^{i-1}}{L_0 - L_0^{i-1}}$$

Abb. 62: Prinzip und Auswertung von Extensometermessungen am Beispiel eines Dreifachextensometers (BRÄUER et al. in Vorb.)

Mit Hilfe von Inklinometer-Messungen werden Gebirgsverformungen erfasst, die senkrecht zu einer Bohrlochachse gerichtet sind. In den meisten Fällen werden dazu Inklinometersonden stationär installiert und regelmäßig oder kontinuierlich vermessen (GLÄSS & SCHNIER 1996). Fissurometer dienen zur Erfassung von Relativbewegungen von Gesteinsblöcken an Klüften oder Rissen. Sie stellen einfache Metallkonstruktionen dar, die mit wenig Aufwand im Gebirge fixiert und regelmäßig in Bezug auf relative Blockverschiebungen im 3D-Raum vermessen werden.

Die genannten In-situ-Methoden werden durch Laborversuche zur Bestimmung der Material- und Festigkeitseigenschaften ergänzt. Die Gesteinseigenschaften werden an Prüfkörpern ermittelt, die in Kurzzeitversuchen in Ein- und Triaxialzellen untersucht werden. Ergänzend werden petrophysikalische Parameter sowie felsdynamische und thermodynamische Kennwerte bestimmt.

Das langfristige Verformungsverhalten (zeitabhängige Deformation) und gegebenenfalls auch dilatante Verformungsprozesse werden insbesondere für Tonstein und Salzgestein (Kriechen) durch ein- und triaxiale Dauerstandversuche an zylindrischen Proben sowie durch echt-dreiaxiale Versuche an Würfelpuben untersucht. Diese Laborexperimente analysieren auch den Einfluss von Variationen von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf die gemessenen Parameter. Die in den Laborversuchen bestimmten Kenngrößen sind zusammen mit den Ergebnissen der In-situ-Versuche wesentliche Ausgangsparameter für die Erarbeitung von Materialgesetzen und für die numerischen Modellberechnungen zur Standfestigkeit des Grubengebäudes, zum Langzeitdeformationsverhalten des Gebirges sowie für die Auswertung von In-situ-Versuchen und für die Langzeitsicherheitsanalyse.

Im Rahmen der In-situ-Untersuchungen werden umfangreiche Messungen der natürlichen Gebirgstemperaturen, des Wärmeflusses und des Temperaturgradienten durchgeführt. Bei vielen geotechnischen Messungen sind Temperaturmessgeber integriert, um die Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf die Messergebnisse beurteilen zu können. Ergänzt werden diese Arbeiten durch Laboruntersuchungen der thermophysikalischen Eigenschaften der Gesteine. Diese Daten sind notwendig für:

- die Planung des Endlagerbergwerkes und die Entwicklung des Endlagerkonzeptes (z. B. Festlegung Endlagerniveau, Bestimmung der Temperaturdifferenz zur maximal möglichen thermischen Belastung der geologischen und geotechnischen Barrieren),
- die Beweissicherung und das Monitoring des Endlagerbetriebes (Nachweis von Endlager-induzierten Temperaturänderungen durch Auffahrungen, Bewetterung und Wärme produzierende Abfälle),
- Berechnungen des möglichen Einflusses der Einlagerung Wärme produzierender Abfälle auf die hydraulischen und geomechanischen Barriereigenschaften sowie
- die Temperaturkorrektur bei geophysikalischen Messungen und In-situ-Versuchen.

Die Temperaturmessungen erfolgen entweder über einfache Messpunkte im Grubengebäude oder mittels Log-Messungen in Bohrungen bzw. durch Permanentmessungen, z. B. mittels faseroptischer Temperatursensorkabeln. Eine vereinzelt angewendete Methode zur Bestimmung vertikaler thermischer Strömungsbewegungen ist die Peclet-Zahl-Analyse (siehe WALLNER et al. 2005)

Die wichtigsten thermophysikalischen Gesteinsparameter Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität werden unter Laborbedingungen an Kernproben analysiert. Die genannten Kenngrößen weisen deutliche gesteinstypspezifische Abhängigkeiten z. B. von der Temperatur, von Druck, mineralogischer Zusammensetzung der Gesteine, Porosität und Porenfüllung auf, was bei der Versuchsdurchführung und -auswertung beachtet werden muss. So z. B. kann es bei der Probennahme infolge Druckentlastung zur Mikrorissbildung kommen, was sich bei Messungen, die nicht in Druckpressen ausgeführt werden, auf die thermischen Gesteinsparameter auswirkt.

3.2.1.4 Untersuchungen endlagerrelevanter gekoppelter Prozesse - Schlüsselexperimente

Zur Untersuchung endlagerrelevanter Fragestellungen reichen einfache, auf die Analyse einzelner Gesteinsparameter oder Einflussfaktoren ausgerichtete Kurzzeitexperimente i.d.R. nicht mehr aus. Es werden daher sogenannte Schlüsselexperimente durchgeführt, die über lange Zeiträume laufen (z. B. Erhitzerexperimente), eine umfangreiche technische Instrumentierung erfordern und/oder räumlich größere Bereiche umfassen. Diese Versuche betreffen die Wirtsgesteine Salz, Granit und vor allem Tonsteine, deren Eigenschaften aufgrund ihrer komplexen Zusammensetzung (siehe Kap. 3.2.2.3) stärker von den Prozessen, die in einem Endlager ablaufen (z. B. THMC) beeinflusst werden. Diese Schlüsselexperimente haben das Ziel, die in einem Endlager auftretenden Prozesse und ihre Wirkung auf das Gebirge zu erfassen, wie z. B. Änderungen der Gebirgsdurchlässigkeiten und Transporteigenschaften für Radionuklide, die Auswirkungen von Streckenauffahrungen oder thermischen Einträgen. Die Experimente konzentrieren sich auf die Analyse der Wechselwirkung bzw. Kopplung von thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozessen (THMC) und ihre Wirkung auf die langzeitliche mechanische und hydraulische Integrität der geologischen Barriere. In den URL's oder Erkundungsbergwerken werden hierfür sehr aufwändige, komplexe multidisziplinäre, integrale wissenschaftliche Versuche (Schlüsselexperimente) unter Berücksichtigung zahlreicher Parameter (z. B. Spannungsfeld, Porendruck, Feuchtigkeit bzw. Wassersättigung und Temperatur) durchgeführt. Die Synthese der verschiedenen Untersuchungen soll unter Hinzunahme von Modellberechnungen ein besseres Prozessverständnis der komplexen Zusammenhänge im System Endlager/Wirtsgestein ermöglichen.

Beispiele für derartige Untersuchungen sind z. B. nachfolgend genannte interdisziplinäre Experimente:

- Untersuchung von Fließ- und Transportprozessen im ungestörten Gestein und entlang von tektonischen Trennflächen (insbesondere des Einflusses von hydro-mechanisch- und hydro-chemisch-gekoppelten Prozessen auf den Porenwasserfluss),
- In-situ-Untersuchungen zur Sorption und Diffusion von Radionukliden am bzw. im Wirtsgestein (oder an bzw. in geotechnischen Barrieren),
- Untersuchung der Abhängigkeit zwischen hydraulischen Gesteinseigenschaften und der Geologie (Gesteinszusammensetzung, stratigraphische Einheiten, Fazies, Störungen und Klüfte, etc.),
- Analyse der maßstabsabhängigen Aspekte der hydraulischen Konduktivität (Einfluss von Anisotropie und Heterogenität verschiedener Faziesseinheiten),

- Bestimmung der Porenwasserdruckentwicklung/-verteilung (besonders im Tonstein) in Abhängigkeit von den geologischen Bedingungen bzw. Milieuparametern,
- Wirkung und Ausdehnung der Auflockerungszone um Endlagerstrecken; geophysikalische, felsmechanische, hydraulische und strukturgeologische Untersuchungen der Trennflächenorientierung und der Ausdehnung der durch die Streckenauffahrung bzw. Spannungsumlagerung induzierten Trennflächen bzw. Mikrorisse,
- Änderung des Festigkeitsverhaltens durch Bewetterung,
- Auswirkungen von Heater-Experimenten auf die hydraulischen und geomechanischen Gesteinseigenschaften und die geotechnischen Barrieren (z. B. POLSTER & JOBMANN 2006),
- Auswirkungen von radioaktiver Strahlung auf das Wirtsgestein bzw. die geotechnischen Barrieren,
- Auswirkungen der Streckenauffahrung auf das Gebirge (Mine by Test) durch Vorfeldinstrumentierung,,
- Pfeilerversuche (Untersuchung der Festigkeitseigenschaften an einem Gebirgspfeiler im Maßstab 1:1),
- Bestimmung der felsmechanischen Eigenschaften mit Langzeitmessungen.

In diesem Zusammenhang werden auch Untersuchungen zum Endlagerkonzept durchgeführt, wie z. B.:

- Auswirkungen der Unterbrechung der Auflockerungszone durch eine geotechnische Barriere (z. B. Schlitzerstellung und Verfüllung mit Bentonit, Key Experiment),
- Untersuchungen zur Verformung von Containern und Hohlräumen durch Veränderung des äußeren Spannungsfeldes und durch Kriechen,
- Versuche zur In-situ-Aufsättigung der Bentonit-Barriere sowie
- In-situ-Versuche zur Korrosion der Container und zur Gasbildung bzw. -migration.

Die Schlüsselexperimente bestehen aus einer Vielzahl einzelner geowissenschaftlicher Versuche unter Anwendung zahlreicher unterschiedlicher interdisziplinärer Untersuchungsmethoden. Die dabei eingesetzten Verfahren entsprechen im Wesentlichen Standardmethoden zur Bestimmung der Gesteins- und Gebirgseigenschaften. Im Rahmen gekoppelter Experimente werden diese Standardmessverfahren kombiniert, ggf. erfolgt

eine Anpassung an spezifische Fragestellungen, geologische Rahmenbedingungen und technische Vorgaben (z. B. Bohrungsdurchmesser und -längen, Messdauer, etc.).

Diese wissenschaftlichen Versuche werden nur z. T. mit handelsüblichem Equipment durchgeführt. Viele der für die Untersuchungen genutzten Geräte sind Spezialanfertigungen, die den entsprechenden Fragestellungen in den verschiedenen Wirtsgesteinen angepasst oder speziell entwickelt wurden. Details der Methoden und Anwendungsergebnisse sind in Fachberichten der mit den Standortuntersuchungen befassten Organisationen (ANDRA, NAGRA, SKB, BGR etc.) beschrieben.

Die zusammenfassende Betrachtung und Interpretation dieser Versuche ermöglicht eine bessere, stärker an den natürlichen, kompliziert wechselwirkenden Prozessen orientierte Charakterisierung der beschriebenen Prozesse bzw. Problemstellungen. Zur Interpretation der Versuchsergebnisse werden ergänzende Modellberechnungen eingesetzt. Im Felslabor Mont Terri wurden bisher 78 solcher Experimente durchgeführt (siehe Kap. 3.2.2.2). Ziele und Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in BOSSART et al. (2008) zusammengefasst.

3.2.2 Besonderheiten der untertägigen Standorterkundung in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Unterschiede in den Eigenschaften und im geologischen Bau der verschiedenen Wirtsgesteinsformationen sowie in den daraus resultierenden wirtsgesteinsspezifischen Erkundungszielen führen dazu, dass die Schwerpunkte bei der untertägigen Standorterkundung und die dabei eingesetzten Untersuchungsmethoden für die einzelnen Gesteinstypen variieren. Während sich die Erkundung eines Salzstocks auf die Bestimmung der Lagerungsverhältnisse und der räumlichen Verteilung unterschiedlicher Salinarschichten, d. h. auf die Analyse des Baustils konzentriert, ist die untertägige Standorterkundung in Tongesteinen (Nachweis von Bereichen mit annähernd homogenen Gesteinseigenschaften) nur mittels Anwendung eines engen Bohrungsrasters möglich. Im Kristallin ist sie vorrangig auf den Nachweis und die Untersuchung von (hydraulisch aktiven) Störungszonen und Gesteinsinhomogenitäten ausgerichtet. Standorterkundungen im Kristallin umfassen demzufolge umfangreiche Untersuchungen zur hydraulischen Charakterisierung der Wirtsgesteinsformation (inklusive Störungszonen). In Tonstein sind umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen zu den Barriereigenschaften im Streckennahbereich und zu den Transporteigenschaften erforderlich. Bei Standorten in Salinarformationen beschränken sich die hydrogeologischen Studien im Wesentlichen auf das Deck- und Nebengebirge. In vergleichsweise geringerem Umfang werden hydraulische Messungen in den salinaren Wirtsgesteinen selbst durchgeführt.

3.2.2.1 Untertägige Standorterkundung im Steinsalz

Im Mittelpunkt der untertägigen Erkundung eines HAW-Endlagerstandortes in Salinargesteinen stehen die für die Eignungsbewertung und die Planung des Endlagers besonders wichtigen Untersuchungen:

- zum Internbau der Salzstruktur (u. a. stratigraphische Einordnung und genaue räumliche Verteilung und Mächtigkeit der Salinarschichten, die im Hinblick auf die Begrenzung endlagergeeigneter z2-Hauptsalzbereiche wichtig sind, wie z. B. z2SF und z3HA; struktureller Bau wie z. B. Lage von Synklinalen/Antiklinalen, Abgrenzung von Homogenbereichen, Vorkommen von Kluftmineralisationen),
- zu den geomechanischen und wärmephysikalischen In-situ-Eigenschaften der Salzgesteine
- zur Lokalisierung und Charakterisierung von Bereichen mit Mineralumwandlungen sowie von eingeschlossenen Lösungen, Gasen und Kondensaten, sowie
- zum Stoffbestand der Salzbarriere, insbesondere zu den Wassergehalten der Gesteine sowie zu den physikalischen Kenngrößen, zum Chemismus und zur isotopengeochemischen Zusammensetzung von Lösungs- und Kohlenwasserstoff-Vorkommen in den Salinarschichten.

Diesbezügliche Informationen liegen im Ergebnis der an der Erdoberfläche und in Übertage-Bohrungen durchgeführten geologisch-geophysikalischen Arbeiten nicht oder nur sehr eingeschränkt vor. Bei der Analyse des Internbaus von Salzstrukturen kommen insbesondere lithologisch-petrographische, feinstratigraphische, mineralogisch-geochemische und struktureologische Untersuchungsverfahren zum Einsatz. Für den Nachweis der langzeitsicherheitsrelevanten Anhydrit- und Kalisalz-führenden Schichten stehen außerdem leistungsfähige und langjährig erprobte geophysikalische Untersuchungsmethoden (elektromagnetische Reflexions- bzw. Radar-Messungen – EMR, akustische Imaging-Verfahren zur Erfassung und Orientierung von Trennflächen in geklüfteten Gesteinsbereichen) zur Verfügung (siehe Kap. 3.2.1.1).

Im Ergebnis der untertägigen Erkundung müssen ausreichend große (abhängig von der Art und Menge der einzulagernden hochradioaktiven Abfälle), annähernd homogene Steinsalzpartien nachgewiesen werden, die im Endlagerkonzept den „einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ bilden. Derartige Steinsalzpartien befinden sich i.d.R. im Zentralbereich von langgestreckten Salzstöcken und weisen aufgrund ihrer Genese nur sehr geringe Wassergehalte von deutlich unter 1 Gew.-% (siehe JOCKWER 1981, BORNEMANN et al. 2008) auf.

Aus langzeitsicherheitlicher Sicht kommt der Erkundung der genauen räumlichen Verbreitung von klüftigen, potenziell lösungsführenden Schichten (z. B. Hauptanhydrit), von tonmineralhaltigen Schichten und von leicht löslichen, felsmechanisch im Vergleich zum Steinsalz instabileren Gesteinen (Kaliflöze) in den Salzstrukturen, insbesondere im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund ihres Spröbruchverhaltens, einer erhöhten Wasserlöslichkeit und stärkeren Temperaturempfindlichkeit müssen im Ergebnis der untertägigen Erkundung detaillierte Kenntnisse zur Verteilung von Kalisalzen in der Salzstruktur vorliegen. Die darauf basierende Ausweisung von Sicherheitspfeilern ist notwendig, um Einflüsse auf die Standfestigkeit der bergmännischen Hohlräume oder Zuflüsse von größeren Lösungsvolumina aus mächtigen Anhydritblöcken ausschließen und eine effektive Wärmeabfuhr aus dem Einlagerungsbereich gewährleisten zu können. Größere Anhydrit- und Toneinlagerungen können zur Ausbildung felsmechanischer Diskontinuitätsflächen führen, die die Gefahr von Firstabbrüchen erhöhen und den Abbau der Spannungsspitzen um bergmännische Hohlräume, d. h. deren Standsicherheit gefährden. Toneinlagerungen im Salzgestein führen zu einer Abnahme des Kompaktionswiderstandes, was sich negativ auf die Permeabilität und das geomechanische Verhalten des Gesteins auswirkt.

Wichtig für den Nachweis der Langzeitsicherheit des geplanten HAW-Endlagers sind auch detaillierte Informationen zum Vorkommen und zur Genese von Klüftbildungen in der Wirtsgesteinsformation. In Salzstöcken werden Klüfte, die entweder verheilt oder mit unter hohen Drücken stehenden Lösungen gefüllt sind, lediglich in Anhydrit- und Tonhaltigen Schichten, wie z. B. im Hauptanhydrit oder im Grauen Salzton beobachtet. Infolge seiner Bildungsbedingungen und Kriecheigenschaften werden im Steinsalz keine offenen, hydraulisch wirksamen Klüfte beobachtet. Steinsalz besitzt auch kein vernetztes Porenvolumen, d. h. es ist quasi undurchlässig bzw. nur sehr gering durchlässig (Permeabilität meist deutlich $< 10^{-21} \text{ m}^2$).

Aufgrund der hohen Dichtheit von unverritztem Steinsalz sind Untersuchungen zu advektiven Transportvorgängen im Steinsalz i.d.R. nicht erforderlich. Messungen der hydraulischen Gesteinsdurchlässigkeiten beschränken sich auf die Auflockerungszonen im Umfeld bergmännischer Auffahrungen und dienen zur Beweissicherung. Die Beurteilung der langfristigen hydraulischen Integrität der Salzbarriere erfordert deshalb keine umfangreichen untertägigen Erkundungsarbeiten. Trotzdem werden zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines HAW-Endlagers im Salz meist folgende Untersuchungen zur Charakterisierung von Fließwegen durchgeführt:

- genaue räumliche Lokalisierung und umfassende Charakterisierung lokal begrenzter Bereiche, in denen vernetzte Poren oder Mikrotrennflächen vorkommen können, wie z. B. der Auflockerungszonen um untertägige Hohlräume, von Bereichen lithologischer Inhomogenitäten (Schichtgrenzen,

z2/z3-Übergang, tektonische Beanspruchungszonen) sowie von stratigraphischen Einheiten, in denen Klüfte beobachtet werden können (z. B. im Hauptanhydrit z3HA),

- Identifizierung und exakte räumliche Lokalisierung möglicher Fließwege, z. B. über miteinander kommunizierende Hauptanhydritschollen oder entlang von leicht löslichen stratigraphischen Einheiten (z2SF),
- hydraulische Charakterisierung des Übergangsbereiches vom Deckgebirge ins Salz im Verlaufe des Schachtabteufens, unter besonderer Berücksichtigung des Hutgesteins (zum größten Teil bereits mittels Bohrungen im Verlaufe der übertägigen Erkundung erfolgt),
- exakte räumliche Ausweisung und komplexe Analyse von Bereichen mit primären Lösungs- und Gasreservoirs (z. B. z3HA, z3OSM).

Die bei der Charakterisierung der Auflockerungszonen und bei den hydraulischen Untersuchungen eingesetzten Messverfahren sind in Kap. 3.2.1.2 beschrieben. Zwecks In-situ-Nachweis von prinzipiell möglichen Schadstofftransportprozessen erfolgen in der Endlagerforschung weltweit Tracertests (z. B. FRICKE & ALEXANDER 1992). Aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeiten und des Fehlens von advektiven Strömungsprozessen werden Tracertests in Salinargesteinen nicht realisiert.

Parallel zu den hydraulischen Messungen sollten umfangreiche hydrochemische Untersuchungen der vereinzelt vorkommenden Lösungszutritte (BfS 2002, SCHRAMM et al. 2009) sowie der fluid inclusions zum Ausschluss von eventuell aus dem Deck- bzw. Nebengebirge zutretenden, ungesättigten Grundwässern durchgeführt werden. Diese Arbeiten dienen auch zur Beweisführung der intrasalinaren Herkunft der in den Salzsichten angetroffenen Lösungen und zum Nachweis, dass sich der Stoffbestand der Salzsichten sowie der darin eingeschlossenen Lösungen seit ihrer Ablagerung bzw. Bildung nicht entscheidend verändert hat. Zur Klärung der Herkunft der Lösungen dienen neben elementgeochemischen Befunden vor allem isotopengeochemische Untersuchungen der Grundwässer, z. B. mittels Analyse der stabilen Isotope Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff sowie der radiogenen Isotope Tritium und ¹⁴C (siehe Kap. 3.1.2). Wichtig für die Nachweisführung der Langzeitsicherheit eines HAW-Endlagers in Salzstrukturen ist die, bisher für Deutschland aufgrund methodischer Probleme noch nicht erfolgte, exakte physikalische Altersbestimmung der in den Salzstöcken vereinzelt vorkommenden Lösungszutritte und Kluftmineralisationen.

Zur Analyse der komplizierten Wechselwirkungsprozesse zwischen den in einem HAW-Endlager ablaufenden THMC-Prozessen wurden im Steinsalz zahlreiche gekoppelte Experimente durchgeführt (siehe auch Kap. 3.2.1.4). Eine große Anzahl dieser, für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes im Steinsalz und die Auslegungsplanung des HAW-

Endlagers unbedingt erforderlichen In-situ-Versuche wurde im URL Asse durchgeführt. Schwerpunktmäßig waren die Arbeiten auf möglichst komplexe Untersuchungen der nachfolgend genannten Themenstellungen ausgerichtet:

- kleinskalige Erhitzerexperimente und thermische Simulation der Streckenlagerung. Zur Simulation der Einlagerung Wärme produzierender Abfälle, d. h. zwecks Überprüfung des Wärmeeinflusses auf die geologische und die (geo)technischen Barrieren, wurden in realitätsnahen Einlagerungsstrecken oder in Einlagerungsbohrlöchern Aufheizversuche mit elektrisch beheizten Dummies durchgeführt.
- Brine Migration Test,
- Pfeilerversuch. Die parallele Durchführung von Verformungs-, mikroakustischen, Ultraschall- und photogrammetrischen Messungen lieferte wertvolle Daten zur Auflockerung, Rissentstehung und Verformung von Salzgesteinen (Abb. 63). Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen eine Verifizierung von Standsicherheitsberechnungen und besser abgesicherte Aussagen zum Langzeitverhalten der Barriere Salz.
- ALOHA-Projekt: EDZ-Entwicklung im Steinsalz,
- ANTON-Projekt: Untersuchungen zum gebirgsmechanischen Verhalten von Anhydrit und Salzton,
- BARITON-Projekt: Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton.



Salzbergwerk Asse II, 750 m - Sohle; Uniaxialer In-situ-Kriechversuch mit einem Druckkissen an einem Steinsalzpfiler (1,5 m x 4,0 m - Tonliniensalz des z2); Versuchszeitraum: 1/1985 - 1/1994 (9 Jahre).

Abb. 63: Pfeilerversuch in der Schachtanlage Asse II (Quelle: BGR)

Neben diesen komplexen wissenschaftlichen Versuchen wurden zahlreiche geotechnische Experimente und Messungen durchgeführt, wie z. B.:

- Überwachung der Standfestigkeit und des Deformationsverhaltens des Gebirges und ggf. des Ausbaus durch Konvergenz-, Extensometer- und Fissurometermessungen,
- Beweissicherung der geometrischen Daten zum Zustand und zum Verhalten der unterirdischen Auffahrungen (Schächte, Strecken, Kammern),
- Hydraulische Charakterisierung des Salinars und Ermittlung von Lösungs- und Gasreservoirien,
- Geochemische Charakterisierung der salinaren Schichten und der Lösungsvorkommen,
- Ermittlung des natürlichen Temperaturfeldes im Salzstock und seiner Veränderungen während der Erkundung oder während des Betriebes,
- Laboruntersuchungen zum Deformationsverhalten der unterschiedlichen stratigraphischen bzw. lithologischen Einheiten,
- Sammlung von Ausgangsdaten für Modellrechnungen zur thermomechanischen Gebirgsbeanspruchung (Angaben zum Kriechverhalten und zur Bruchfestigkeit sowie aus Erhitzerversuchen).

Ergänzend zu den geowissenschaftlichen Arbeiten werden im Rahmen der untertägigen Standorterkundung umfangreiche Erprobungen der Einlagerungstechnik sowie In-situ-Untersuchungen zur standortspezifischen Auslegung der technischen und geotechnischen Barrieren durchgeführt. Die Arbeiten konzentrieren sich auf:

- Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen geologischer und technischen Barrieren sowie zur Wirksamkeit der (geo)technischen Barrieren (z. B. In-situ-Korrosionsversuche zur Entstehung sowie zum Transport der dabei gebildeten Fluide bzw. Gase, Gasmigration),
- Versuche zum Verhalten von Versatz- bzw. Verschlussmaterialien bei Änderung der Rahmenbedingungen, wie z. B. der Temperatur oder der Wassersättigung,
- Dammbau, Strecken- und Schachtverschlüsse. Diese Arbeiten wurden auf der Schachanlage Asse II und in den Salzbergwerken Salzdetfurth, Sondershausen und Teutschenthal durchgeführt.
- Untersuchungen zum Bohrlochverschluss (DEBORA-Projekt),

- Entwicklung der Einlagerungstechnik für die Streckenlagerung der Pollux-Behälter (in Landesbergen bei Nienburg) und für die Bohrlochlagerung,
- Erprobung der Bohrtechnik für die Einlagerungsbohrlöcher,
- Salzgruskompaktion und langfristiges Verhalten des Backfill-Versatzes (BAMBUS-Projekt),
- Tests von Abschlussbauwerken sowie
- die Analyse des Einflusses von radioaktiver Strahlung auf die Salinargesteine (mögliche Radiolyseeffekte) und von Laugenmigration auf die geomechanischen Eigenschaften der Salzsichten.

3.2.2.2 Untertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben

Nach dem Abschluss der wesentlichsten Untersuchungen im Rahmen der übertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben (siehe Kap. 3.1.3) begann mit dem Abteufen der beiden, ca. 400 m voneinander entfernten Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 das untertägige Erkundungsprogramm. Die Vorgehensweise und die wesentlichsten Ergebnisse der untertägigen geologisch-geotechnischen Erkundung des Salzstocks Gorleben sind in HUND et al. (1991), STIER-FRIEDLAND et al. (1997), BORNEMANN et al. (2008) und BRÄUER et al. (in Vorb.) dargestellt.

Wesentlichstes Ziel der untertägigen Erkundungsarbeiten ist die Vervollständigung der für den Langzeitsicherheitsnachweis sowie für die Beurteilung der Eignung des Salzstocks als mögliches HAW-Endlager erforderlichen standortbezogenen Daten. Dies erfordert eine gezielte Ergänzung der aus den übertägigen Erkundungsarbeiten bereits vorhandenen Kenntnisse zum geologischen Bau (Lagerungsverhältnisse, Petrographie, Stratigraphie und Mineralogie/Geochemie der salinaren Schichten) sowie zu den felsdynamischen, thermomechanischen und geohydraulischen In-situ-Eigenschaften der für die HAW-Einlagerung vorgesehenen Bereiche des Salzstockes. Diese Daten dienen auch zur Planung und Beweissicherung des Endlagerbergwerkes sowie zu seiner Überwachung in der Betriebsphase.

LANGER & VENZLAFF (1988) nannten als wesentlichste Aufgaben der untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben:

- die Bewertung der thermomechanischen Belastbarkeit der Salzformation, um Einlagerungsstrategien bei der Konzeptfindung standortspezifisch festlegen zu können,
- die sichere Dimensionierung der Bergwerkshohlräume (Standicherheit, Betriebssicherheit) bei der Bergwerksplanung und -errichtung sowie

- die nachprüfbare Barrierenbewertung bzw. den Langzeitsicherheitsnachweis für das Planfeststellungsverfahren.

Dazu ist es notwendig, ausreichend große, annähernd homogene Steinsalzpartien innerhalb des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge nachzuweisen, in die die radioaktiven Abfälle, unter Beachtung der erforderlichen Sicherheitsabstände zu anhydritischen und Kalisalzschichten, eingelagert werden können. Im Ergebnis der Erkundungsarbeiten müssen detaillierte Informationen zur räumlichen Verbreitung von nicht für die Endlagerung geeigneten bzw. von für die Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers besonders relevanten Salzschichten, inklusive Lage und lithologische Ausbildung des Staßfurt-Hauptsalzes, vorliegen (BORNEMANN et al. 2008).

Im Rahmen der untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben erfolgten folgende geologische Untersuchungen:

- Vorbohrungen für Streckenauffahrungen (sogenannte Untersuchungsbohrungen, meist mit einem Bohrungsdurchmesser von 98 mm),
- Vorerkundungsbohrungen für den nächst gelegenen Auffahrungsabschnitt zum Nachweis von Lösungs- und Gasfreiheit (Sichtung der cuttings auf z2SF oder z3HA, um unkontrollierte Laugen- oder Gasausbrüche zu vermeiden),
- horizontale und vertikale/geneigte Erkundungsbohrungen,
- Streckenauffahrungen,
- geotechnische Bohrungen für Verformungsmessungen, Spannungsmessungen etc.,
- Bohrungen für spezielle Probenahmen (sog. Probenahmebohrungen) sowie
- örtlich begrenzt Tastbohrungen (bis zu 40 m lange Bohrungen zum Ertasten von Lage und Ausbildung bestimmter Schichten, wie z. B. z2SF).

In den gekernten geologischen Erkundungsbohrungen wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Bohrlochverlaufsmessungen,
- Gebirgstemperaturmessungen,
- Permeabilitätsmessungen sowie
- elektromagnetische reflexionsseismische Messungen (EMR).

Die Kerne der genannten Bohrungen wurden detailliert petrographisch, stratigraphisch, strukturgeologisch und mineralogisch-geochemisch bearbeitet. Auf der Grundlage der Daten zur Verbreitung und strukturgeologischen Position der unterschiedlichen stratigraphischen Einheiten wurde ein geologisches Lagerstättenmodell erarbeitet, das bei Vorlage neuer Erkundungsergebnisse fortlaufend aktualisiert wurde. Die stofflich-strukturelle Analyse der räumlichen Zusammensetzung und des strukturgeologischen Baus des Salzstocks liefert wichtige Informationen zur Genese des Evaporitkörpers. Auf der Grundlage dieser Daten sind Schlussfolgerungen zu seiner weiteren geologischen Entwicklung möglich, was außerordentlich wichtig für die Bewertung der Langzeitsicherheit (langfristige Barrierenintegrität) des geplanten Endlagers ist.

Die Auffahrung der Hohlräume im Infrastrukturbereich sowie der Querschläge und Strecken zur detaillierten Erkundung des Erkundungsbereiches 1 (EB 1) begann mit dem Aussetzen der Füllörter (Übergang eines Schachtes in die horizontale Auffahrung) auf der 840 m-Sohle am 4.10.1995 an Schacht 1 bzw. am 18.11.1995 an Schacht 2. Mit dem Vortrieb der Querschläge 1 West bzw. 1 Ost und der Nördlichen Richtstrecke erfolgte im Bereich des EB 1 die Umfahrung des für die HAW-Einlagerung vorgesehenen z2-Steinsalzes. Parallel zu den bergmännischen Arbeiten wurden die geologischen Verhältnisse in allen Auffahrungen detailliert kartiert, dokumentiert und in das Risswerk bzw. in das von der BGR erstellte geologische Lagerstättenmodell übertragen.

Neben den geologischen Erkundungsbohrungen wurde eine Vielzahl von geotechnischen Bohrungen durchgeführt, um das gebirgsmechanische Verhalten und die In-situ-Eigenschaften der Salzgesteine zu untersuchen. In den geotechnischen Bohrungen erfolgten Verformungs- und Spannungsmessungen in Form von:

- Extensometer- und Inclinometermessungen mit unterschiedlichen Teufenabständen in Bezug zur Hohlraumkontur,
- Konvergenzmessungen,
- Fissurometermessungen sowie
- Kurz- und Langzeitspannungsmessungen mittels z. B. Hydrofrac und Überbohrversuchen.

Die Verformungsmessungen ergaben eine deutliche Abhängigkeit der Messwerte von der Petrographie und vom Wassergehalt der Gesteine sowie von der Bewitterung (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und von der Lage der Messpunkte innerhalb der Salzstruktur (Durchbauungsgrad, geologischer Bau). Die Ergebnisse der Gebirgsspannungsmessungen fixieren den gebirgsmechanischen Ausgangszustand und dienen zur Bestimmung des Einflusses des Endlagerbaus und der Wärme produzierenden Abfälle auf die Standsicherheit und Barriereintegrität. Ergänzend zu den Untersuchungen in Bohrungen wurden an

den Stößen und Firsten der Auffahrungen Konvergenz- und Fissurometermessungen durchgeführt. Für diese Deformationsmessungen wurden in den Schächten und Strecken spezielle Messstationen eingerichtet.

Ein mikroseismisches (akustisches) Messnetz zur Lokalisierung von Spannungskonzentrationen und daran gebundenen bruchhaften Ereignissen (Mikrorissbildungen) konnte aufgrund des Moratoriums im Erkundungsbergwerk Gorleben bisher nicht installiert werden. Mikroakustische Messungen ermöglichen prinzipiell die Ermittlung und räumliche Zuordnung von Schallemissionen, die durch Rissbildungen im Gestein hervorgerufen werden, z. B. im Umfeld von Auffahrungen oder im Kontaktbereich von sich geomechanisch unterschiedlich verhaltenden Gesteinstypen. Diese Messungen wurden mit Erfolg z. B. im ERA Morsleben durchgeführt. Ebenfalls geplant ist die Charakterisierung der auffahrungsnahen Auflockerungszonen mittels einer Kombination von Permeabilitätsmessungen, ortsauflösenden geophysikalischen Untersuchungen (Georadar, Seismik und Geoelektrik), Spannungsfeldbestimmungen und geologischen Untersuchungen (z. B. LÜDELING et al. 1999, 2001, KUHLENKAMPFF et al. 1999).

Die Messungen der natürlichen Gebirgstemperaturen lieferten die Ausgangsdaten für Berechnungen der thermomechanischen Auswirkungen der HAW-Einlagerung (Referenzwerte für den Nachweis einlagerungsbedingter Eigenschaftsänderungen - Beweissicherung). Außerdem ermöglichen sie die Lokalisierung von möglichen Fluidzutritten.

Zur Bestimmung der in Salzgesteinen i.d.R. sehr geringen hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeiten wurden im Rahmen der untertägigen Erkundung des Standortes Gorleben spezielle Messprozeduren und Auswertelgorithmen für die Permeabilitätsmessungen entwickelt und eingesetzt, wie z. B. Injektionsversuche, Multiphase-Packertests oder Slug-Tests. Permeabilitätsmessungen wurden im Hauptsalz und in den Gesteinen der Leine-Folge durchgeführt, ergänzt durch Untersuchungen in bis zu 3 m langen Kurzbohrungen zur Charakterisierung der Auflockerungszone im Umfeld bergmännischer Auffahrungen. Die Untersuchungen erbrachten z. B. den Nachweis, dass das Hauptsalz im unverritzten Zustand Permeabilitäten von kleiner 10^{-20} m^2 aufweist. Im Verlaufe der übertägigen Erkundung kamen Doppelpackertests sowie Piezometermessungen und Bestimmungen der Standrohrspiegelhöhen in Bohrungen zur Anwendung (siehe Kap. 3.1.2 und 3.1.3).

Zur Vorfelderkundung und außerhalb des durch Bohrungen erfassten Raumes, insbesondere zum Nachweis der räumlichen Lage von Schichtgrenzen ton- und anhydrithaltiger Gesteinsschichten (z. B. Gorleben-Bank, Hauptanhydrit) sowie zur Erfassung durchfeuchteter, laugengesättigter Salzstockbereiche werden in Salzformationen intensiv EMR-Messungen (elektromagnetische Reflexions- bzw. Radar-Messungen) eingesetzt (Abb. 64). Günstige Rahmenbedingungen, wie geringe Ton- und Anhydritgehalte

sowie niedrige Wasseranteile können in Kombination mit leistungsfähigen Messgeräten dazu führen, dass mittels EMR auch der mehrere Hundert Meter von der Erkundungssohle entfernte Salzspiegel und die Salzstockbasis erkundet werden können. Bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben führte der gezielte Einsatz der EMR-Methode zu einer signifikanten Reduzierung der für die Erkundung der Salzstockflanken erforderlichen Anzahl von Bohrungen. Als besonders geeignet für die Riss- und Reflektorenermittlung im Umfeld von Auffahrungen und Bohrungen haben sich bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben richtungssensitive Radarmessungen in Strecken und Erkundungsbohrungen erwiesen (EISENBURGER et al. 2006).

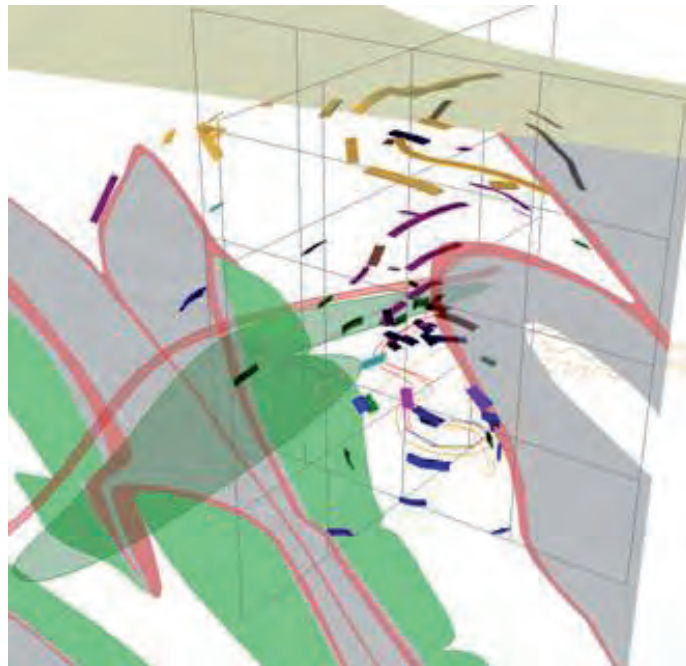


Abb. 64: Nutzung von EMR-Messungen zur Rekonstruktion des strukturellen Aufbaus von Salzstöcken und zur Abstandsbestimmung zu Schichten, die für eine HAW-Endlagerung ungeeignet sind (Quelle: BGR)

Parallel zu den In-situ-Messungen wurden an Kernproben im Labor umfangreiche geomechanische Untersuchungen (siehe BRÄUER et al. in Vorb.) durchgeführt. Diese, für die Lieferung der Basisdaten für geomechanische Modellierungen und für die Abgrenzung der Homogenbereiche unbedingt erforderlichen Arbeiten umfassten die Ermittlung folgender Kenngrößen:

- Dichte,
- feldynamische Kennwerte,
- elastisches Verformungsverhalten,

- Spaltzugfestigkeiten,
- einaxiale und triaxiale Druckfestigkeiten,
- Nachbruchfestigkeiten,
- Bruchverzerrungen sowie
- Kriechverhalten.

Außerdem erfolgten Bestimmungen der petrographischen Zusammensetzung sowie der hydraulischen und wärmephysikalischen Gesteinsparameter. Dazu zählen z. B. Untersuchungen:

- zur Porosität (Pyknometer-Porosität, Wasserverlust-Porosität, Porenraumgeometrie),
- zum Sättigungsverhalten und zur Permeabilität der Gesteine sowie
- zu Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Wärmeausdehnung.

Aufgrund ihrer möglichen langzeitsicherheitlichen Relevanz und zur Beweissicherung wurden die im Erkundungsbergwerk Gorleben festgestellten Lösungs- und Gas- bzw. Kondensatvorkommen detailliert erfasst und, wenn ausreichend Probemenge vorhanden war, geochemisch analysiert. Im „Lösungskataster Gorleben“ (BfS 2002) wurden die Probenahmedaten (z. B. Ort und Datum des Zutritts, Zutrittsrate und -menge) sowie die physikalischen und geochemischen Analyseergebnisse zusammengestellt. Die auf diesen Daten und dem geologischen Standortmodell basierenden Schlussfolgerungen zur Bindung der Lösungen an bestimmte stratigraphische Einheiten und Strukturelemente im Salzstock dienen zum Nachweis der Herkunft bzw. zur genetischen Interpretation der Lösungs- und Gasvorkommen (STIER-FRIEDLAND et al. 1997, BÄUERLE 2000, BfS 2002, SCHRAMM et al. 2009). Unterstützt werden die Schlussfolgerungen zur Herkunft und zum Migrationsweg der Lösungen und Gase durch spezielle hydro- und gaschemische sowie isotopengeochemische Untersuchungen, wie z. B. Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenmessungen, Tritium-Analysen und Bestimmungen der Aromatenverteilung in den kohlenwasserstoffhaltigen Proben.

Parallel zur untertägigen geologisch-geotechnischen Erkundung erfolgte umfangreiche anwendungsbezogene Grundlagenforschung zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und Abfalltypen sowie zur Optimierung des Endlagerkonzeptes.

3.2.2.3 Untertägige Standorterkundung in Tonsteinen

Die untertägige Erkundung von potenziellen HAW-Endlagerstandorten in Tonsteinen muss, ähnlich wie für die Wirtsgesteine Steinsalz und Kristallin, detaillierte Daten zur Zusammensetzung und zu den endlagerrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteine sowie zum Einfluss des Endlagerbaus und -betriebes auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen des Multibarrierensystems liefern. Die Erkundungsdaten vertiefen und erweitern die bereits vorhandenen Standortkenntnisse aus den übertägigen Untersuchungen und schaffen damit die Voraussetzungen für den im Rahmen des Genehmigungsverfahrens vorzulegenden Langzeitsicherheitsnachweis.

Tonsteine haben im Gegensatz zu Salz- oder Kristallingesteinen eine sehr komplexe mineralogische Zusammensetzung, die aufgrund möglicher Faziesänderungen bei der Ablagerung, infolge Diagenese bzw. Metamorphose und aufgrund unterschiedlicher Liefergebiete sowohl lateral wie auch vertikal stark wechseln kann und die sehr sensitiv auf physikalische (mechanische), hydraulische, chemische und thermische Einflüsse reagiert. Aus einer schwankenden Zusammensetzung der tonigen Gesteine ergeben sich beispielsweise z. T. deutlich variierende Transport- und Radionuklid-Rückhalteigenschaften. Daraus folgt die Notwendigkeit detaillierter diesbezüglicher Untersuchungen. Ähnlich wichtig für Langzeitsicherheitsanalysen sind exakte Kenntnisse über das Diffusions- und Retentionsverhalten der Tonsteine. Beide Fragestellungen bilden daher auch die Schwerpunkte in den internationalen In-situ-Forschungsprogrammen zur HAW-Endlagerung in tonigen Gesteinen. Außerdem sind die untertägigen Standorterkundungsarbeiten vordergründig auf folgende Erkundungsziele ausgerichtet:

- Analyse der geologischen Besonderheiten (lithologische und mineralogisch-geochemische Zusammensetzung, Fazies, Diagenese/ Metamorphose) sowie der hydrogeologischen, geochemischen und mechanischen Eigenschaften der Tonsteine,
- detaillierte Untersuchung der tonmineralogischen Zusammensetzung der Tonfraktion,
- Analyse des Schadstofftransport- und -rückhaltevermögens (z. B. Kationenaustauschkapazität) der Gesteine,
- Untersuchungen zum Vorkommen und zur Zusammensetzung primärer Lösungs- und Gasreservoirs,
- geochemische Charakterisierung des Porenwassers im Tonstein,
- Analyse des Einflusses von Kolloiden, mikrobiologischer Aktivität und osmotischem Druck sowie von thermischen Prozessen auf den Radionuklidtransport mittels Diffusion bzw. Thermodiffusion,

- Entwicklung und Test von innovativen Techniken und Methoden zur In-situ-Charakterisierung von Tonstein, wie z. B. Entwicklung von Methoden zur Extraktion und Infiltration von Porenwässern, Entwicklung natürlicher Tracer für hydrogeologische Tracer-Versuche, In-situ-Analyse der Transport- und Retentionsmechanismen für Radionuklide,
- Weiterentwicklung von Methoden zur Untersuchung von Wechselwirkungen der Wirtsgesteine mit den eingebrachten Materialien (Korrosion, Gasentwicklung), zur Interpretation der Testergebnisse und zur Modellierung von endlagerrelevanten Prozessen sowie
- In-Situ-Tests von Endlagerkonzepten und Einlagerungstechnik.

Im Gegensatz zu Salzgesteinen, für die im Ergebnis umfangreicher Forschungsarbeiten ausreichend abgesicherte und validierte Stoffgesetze zu ihrem Verhalten bei Temperaturerhöhungen oder Stressbeanspruchungen vorliegen (HUNSCHE et al. 2003, SCHULZE 2007), steht die Entwicklung von Stoffgesetzen für Tonsteine auch im internationalen Rahmen noch am Anfang. Die z. T. stark schwankende mineralogisch-geochemische Zusammensetzung von Tonformationen und die komplexen thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischen (THMC) Wechselwirkungen zwischen den einzelnen endlagerrelevanten Prozessen erschweren diese Arbeiten.

Ein wesentliches Kriterium für die Eignung von Tonstein für die HAW-Endlagerung sind seine Diffusions- und Retentionseigenschaften. Da diese maßgeblich die Transporteigenschaften und -vorgänge bestimmen, sind Untersuchungen zu deren Charakterisierung sehr wichtige Arbeitsschwerpunkte. Aufgrund der sehr langsamen Vorgänge und des geringen Wassergehaltes der Tonsedimente mussten hierfür spezielle In-situ- und Labormethoden entwickelt werden, die die geringe Durchlässigkeit und die niedrige Diffusionsgeschwindigkeit berücksichtigen (THURY & BOSSART 1999, RÜBEL et al. 2002, PEARSON et al. 2003).

In Tongesteinen nehmen Untersuchungen zur Charakterisierung der Auswirkungen von Streckenauffahrungen und endlagerrelevanten Prozessen auf die Zusammensetzung und die Barriereigenschaften der Wirtsgesteine einen breiten Raum ein. Felsmechanische Untersuchungen wurden in Tonsteinen bisher fast ausschließlich im Rahmen von Tunnelbauprojekten und beim Durchteufen von tonigen Deckgebirgsschichten durchgeführt. Da deshalb im Unterschied zu Salz und Kristallin im Tonstein nur geringe Bergbauerfahrungen bestehen, mussten zur Untersuchung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Tonstein und zur Festlegung der Auffahrungstechnologie bzw. -technik bestehende Methoden angepasst bzw. neu entwickelt werden.

Die Einlagerung Wärme produzierender Abfälle bewirkt besonders in Tongesteinen komplexe Veränderungen. Es handelt sich dabei um eine Kopplung von thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Vorgängen, die auf die Wechselwirkung auffahrungsbedingter Prozesse (Spannungsumlagerung, Entwicklung von Auflockerungszonen, Bewetterung etc.) mit dem Wirtsgestein und den Endlagerkomponenten (Container mit Abfällen, eingebrachte Versatz- und Verschlussmaterialien und Dammbauwerke) zurückzuführen sind. Die Untersuchungen an einem geplanten Endlagerstandort müssen mögliche Langzeitänderungen der Gebirgs- und Gesteinseigenschaften analysieren, die z. B. durch die Temperatureinwirkung der Abfälle oder durch Spannungsfeldänderungen infolge bergmännischer Auffahrungen verursacht werden.

Zur Untersuchung komplexer Fragestellungen und gekoppelter Prozesse werden, ähnlich wie im Salz und Kristallin (siehe Kap. 3.2.2.1 und Kap. 3.2.2.5), interdisziplinäre Experimente durchgeführt. Sie bestehen jeweils aus einer Vielzahl einzelner geowissenschaftlicher Versuche unter Anwendung zahlreicher unterschiedlicher Messmethoden. Ihre Auswertung wird erst durch die zusammenfassende Betrachtung und Interpretation dieser Versuche ermöglicht. Die eingesetzten Untersuchungsverfahren entsprechen im Wesentlichen Standardmethoden zur Bestimmung der Gesteins- und Gebirgseigenschaften (siehe Kap. 3.2.1). Es erfolgt jedoch eine Anpassung an die wirtsgesteinsspezifischen Fragestellungen, die konkreten geologischen Rahmenbedingungen und technischen Vorgaben (z. B. Bohrungsdurchmesser und -längen, Messdauer, Material etc.). So z. B. müssen die spezifischen Festigkeitseigenschaften von Tongesteinen bei geotechnischen Standarduntersuchungen im Rahmen des Standsicherheitsnachweises berücksichtigt werden. Außerdem musste für langzeitliche hydrogeologische Versuche in Tongesteinen ein spezielles korrosionsbeständiges Equipment entwickelt werden, da das Porenwasser in Tongesteinen in seiner Zusammensetzung und in den Eigenschaften den Lösungen salinärer Formationen ähnelt.

Ergänzend zu den In-situ-Untersuchungen sind Laborversuche zur Bestimmung von Gesteinskennwerten und zur Analyse von kleinmaßstäblichen Prozessen notwendig. Die im Rahmen der abschließenden Langzeitsicherheitsanalyse erforderlichen Modellberechnungen nutzen die in den Labor- und In-situ-Versuchen bestimmten Parameter und Ergebnisse, um die Wechselwirkungen der komplexen Vorgänge besser bewerten und deren Einfluss auf den langfristig sicheren Einschluss der Abfälle exakter vorhersagen zu können.

Die bei der untertägigen Charakterisierung von Endlagerstandorten in Tongesteinen eingesetzten Untersuchungsmethoden und die dabei zu klärenden Fragestellungen lassen sich, wie nachfolgend beschrieben, in drei Gruppen einteilen.

Ermittlung der standortspezifischen Gesteinsparameter und Gebirgseigenschaften

Im Ergebnis der untertägigen geologisch-geotechnischen Erkundungsarbeiten muss ein möglichst homogener, nicht gestörter Tongesteinsbereich in der erforderlichen Größe und Zusammensetzung nachgewiesen werden. Dafür sind insbesondere solche Einflussfaktoren auf die Barriereigenschaften der Tonformation und auf das Endlagerkonzept detailliert zu untersuchen, wie signifikante Änderungen im Mineralbestand (z. B. deutlich erhöhte Karbonat- oder Quarzgehalte, Gehalte von Wasser und organischen Bestandteilen), Vorkommen von Sand- oder Schluffeinschaltungen, Anisotropien in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften der Tonsteine sowie Vorkommen von Klüften und Sekundärmineralisationen in den Gesteinen.

Die Ermittlung der standortspezifischen Gesteinsparameter und Gebirgseigenschaften konzentriert sich zunächst auf das ungestörte Gebirge. In späteren Phasen der untertägigen Standorterkundung erfolgt auf dieser Basis eine detaillierte Analyse der auffahrungs- und endlagerbedingten Einflüsse auf die Barriereigenschaften des Wirtsgesteins.

Geologische und mineralogisch-geochemische Charakterisierung der Wirtsgesteine

Die mineralogische Zusammensetzung, das Gefüge sowie die geochemischen und physikalischen Eigenschaften von tonigen Gesteinen können standortspezifisch schwanken, da Tonsteine als sedimentäre Bildungen in unterschiedlichen regionalgeologischen Einheiten bzw. Sedimentbecken verschiedene Liefergebiete und Ablagerungsbedingungen aufweisen sowie unterschiedliche geologische Entwicklungen erfahren haben. Dadurch können die laterale und vertikale Erstreckung sowie die lithologische Zusammensetzung prinzipiell geeigneter Tonformationen ablagerungs- und faziesbedingt lokal deutlich variieren. Ein Schlüsselthema der untertägigen Untersuchungen ist daher die Vertiefung der übertägigen Erkundungsergebnisse zu den geologischen Standortparametern. Hierzu gehören u. a. folgende Untersuchungen:

- Erkundung der räumlichen Variabilität von Lithologie, Fazies und Gefüge der Tonsteine in unterschiedlichen Maßstäben (lateral/vertikal im kleinmaßstäblichen Bereich sowie im gesamten geplanten Einlagerungsbereich),
- Analyse der räumlichen Verteilung von sandigen Schichten bzw. Linsen,
- mineralogische und geochemische Charakterisierung der Wirtsgesteine,
- Untersuchungen zur Diagenese bzw. Metamorphose der Tonformation sowie
- strukturgeologische Aufnahme der Gesteine.

Zur Charakterisierung der makroskopisch erfassbaren Parameter und Eigenschaften erfolgt direkt nach der Streckenauffahrung eine detaillierte geologische Aufnahme der Ortsbrust und der Streckenstöße (inklusive auffahrungsbedingter Trennflächen). Gleichzeitig werden Proben entnommen, an denen umfangreiche mineralogisch-geochemische, petrographische, felsmechanische und gesteinsphysikalische Untersuchungen durchgeführt werden. Die im Zuge der untertägigen Standorterkundung gestoßenen Bohrungen werden überwiegend gekernt und entsprechend detailliert aufgenommen. In ihnen werden standardmäßig Gamma-Ray- und Sonic-Logs gemessen, um Unterschiede in der Lithologie, wie z. B. Vorkommen von sandigen Zwischenlagen oder Linsen zu erfassen. Zur Untersuchung von Heterogenitäten und Anisotropien werden neben den genannten Verfahren seismische und geoelektrische Methoden in Bohrungen und in Strecken eingesetzt. Dadurch können neben lithologischen Unterschieden auch undeformierte von deformierten bzw. von tektonisch beeinflussten Bereichen unterschieden werden. Dazu gehört auch die Charakterisierung von durch die Streckenauffahrung beeinflussten Gebirgsbereichen, z. B. aufgelockerte Zonen im Umfeld der Auffahrungen (Abb. 65).

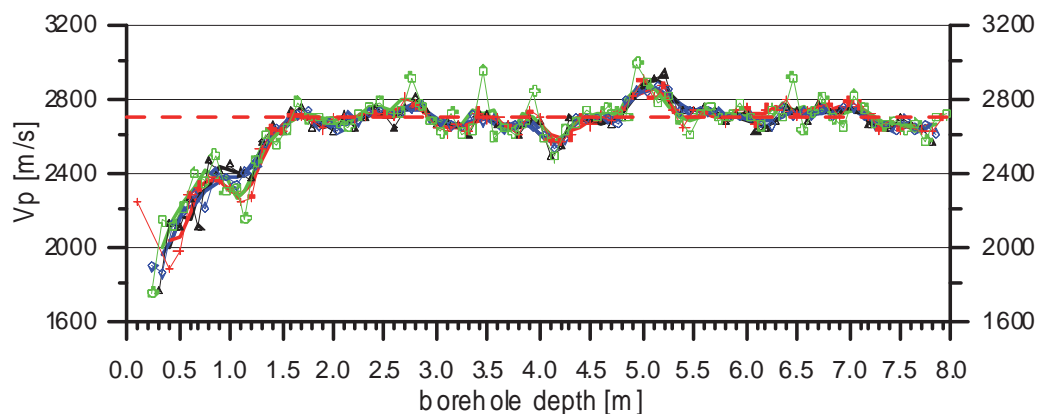


Abb. 65: Ergebnisse von Ultraschall-Messungen im URL Mont Terri zur Bewertung des Ausmaßes und der Intensität der Auflockerungszone um eine Streckenauffahrung (Quelle: BGR)

Die strukturgeologischen Untersuchungen umfassen vor allem die Charakterisierung der auffahrungsbedingten Trennflächen und sofern vorhanden von Klüften. Im Regelfall kommen in nur schwach metamorph überprägten Tonsteinen keine vernetzten Kluftsysteme vor. Ehemals vorhandene Klüfte sind meist verheilt. Die strukturgeologische Aufnahme an den Stößen und in Erkundungsbohrungen konzentriert sich deshalb auf die Trennflächen der Auflockerungszone, um die Form und Ausdehnung der infolge der bergmännischen Arbeiten geschädigten Gebirgsbereiche bestimmen zu können. Um die Trennflächen zu visualisieren, erfolgt eine detaillierte Trennflächenaufnahme an den Stößen. Außerdem wird in Bohrungen, die später überbohrt werden, fluoreszierendes Kunstharz injiziert, um Trennflächen sichtbar zu machen. In Abb. 66 ist anhand eines Beispiels die Visualisierung sekundärer Trennflächen an Streckenstößen und in einem, zur Unterbrechung der Auflockerungszone geschaffenen Schlitz dargestellt.

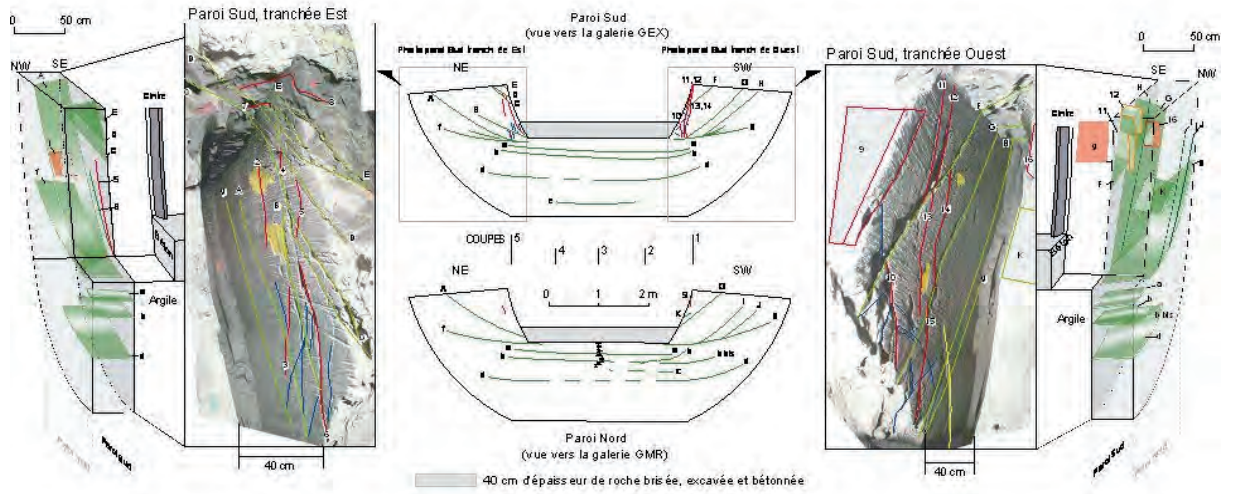


Abb. 66: Visualisierung der im Umfeld einer Streckenauffahrung in Tonsteinen gebildeten Trennflächen (Quelle: ANDRA)

Die lithologische Ansprache ist bei homogen zusammengesetzten Tonsteinen makroskopisch schwierig und häufig nur im mikroskopischen Bild oder durch aufwändige geochemische (z. B. Bestimmung des CaCO_3 -Gehaltes) bzw. mineralogische Untersuchungen (z. B. mittels Röntgendiffraktometrie) möglich (Abb. 67).

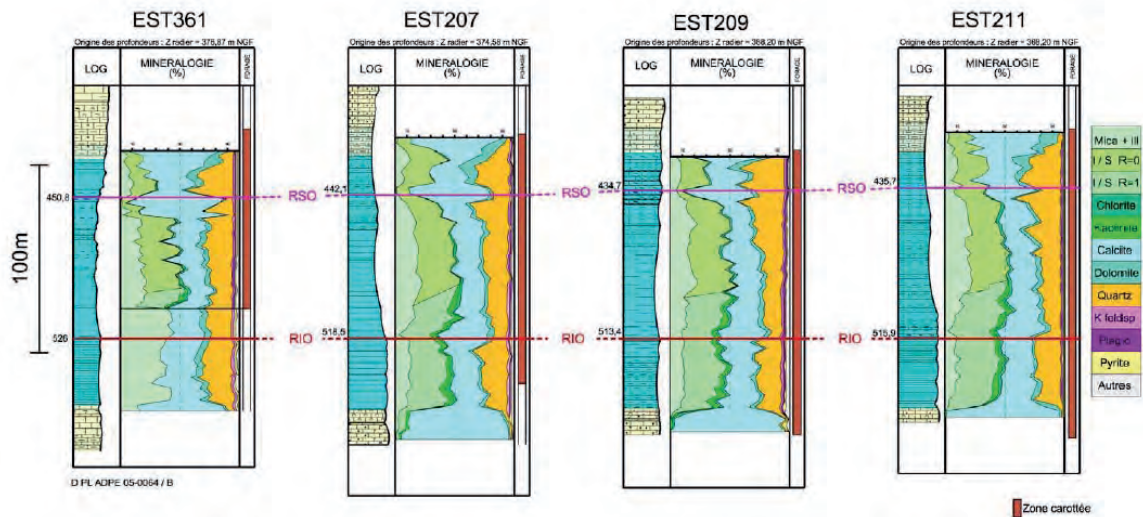


Abb. 67: Bandbreite der Schwankungen in der mineralogischen Zusammensetzung der für die Endlagerung vorgesehenen Tonformation im Bereich des URL Meuse/Haute Marne (Quelle: ANDRA)

Geomechanische Gebirgseigenschaften

Die im Verlaufe der untertägigen Erkundungsarbeiten durchzuführenden felsmechanischen Untersuchungen dienen zur Ermittlung von standortspezifischen Kennwerten (z. B. Dichte, Festigkeit, Anisotropie, etc.), zur geomechanischen Charakterisierung des Gesteins und zur Analyse des Gebirgsverhaltens bei der Auffahrung des Bergwerkes sowie zur Beurteilung des thermischen Einflusses durch Wärme produzierende Abfälle. Die Analyse des mechanischen Verhaltens beinhaltet Untersuchungen des Kurz- und Langzeitverhaltens, des Einflusses unterschiedlicher Auffahrungstechniken und der Kopplung des Gebirgsverhaltens mit thermischen, hydraulischen und chemischen Einflüssen (Abb. 68).



Abb. 68: Durchführung von Bohrlochverformungsmessungen zur Bestimmung des Gebirgsverformungsverhaltens (URL Mont Terri; Quelle: BGR)

Die geomechanische Analyse des ungestörten Gebirges und des Festigkeitsverhaltens von Tongesteinen ist von besonderer Bedeutung, da sich die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins durch die Streckenauffahrungen bzw. endlagerbedingte Einflüsse ändern und die Kenntnis des Ausgangszustandes zur Beurteilung dieser Prozesse benötigt wird. Wesentliche Untersuchungsschwerpunkte sind dabei die Ermittlung der primären Gebirgsspannungen (Spannungsbeträge und -richtungen), die Analyse des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens der Gesteine sowie der Anisotropie der geomechanischen Gebirgseigenschaften. Die dabei angewandten Methoden entsprechen weitgehend den in Kap. 3.2.1.3 beschriebenen Verfahren.

Angaben zur Orientierung der Spannungsvektoren sind außerordentlich wichtig für die Bergwerksplanung und für den Langzeitsicherheitsnachweis. Die Strecken, in denen die Einlagerung der Abfälle vorgesehen ist, sollten längs zur horizontalen Hauptspannung im Wirtsgestein orientiert sein, um die auffahrungsbedingten Auflockerungen zu reduzieren. Aus der Orientierung der Spannungsvektoren lassen sich unter Zugrundelegung von Untersuchungsbefunden zu den lithologisch-strukturellen Besonderheiten der Tonsteinformation geomechanische Anisotropien ableiten, die auch die hydraulischen Eigenschaften beeinflussen.

Hydrogeologische Wirtsgesteinseigenschaften

Tonsteine besitzen eine sehr geringe Permeabilität (siehe z. B. HAMMER et al. 2009). Für die Bestimmung der hydraulischen Gebirgs- und Gesteinsparameter im ungestörten Wirtsgestein und im Bereich der Auflockerungszone um Strecken und Schächten werden die in Kap. 3.2.1.2 beschriebenen Untersuchungsmethoden eingesetzt (z. B. Abb. 69). Dabei werden überwiegend Gaspermeabilitätstests in Bohrungen und geophysikalische Untersuchungen zur Detektion von ungesättigten und gesättigten Bereichen durchgeführt, die durch Labortests zur Bestimmung von hydraulischen Gesteinsparametern (z. B. Kapillardruck, relative Permeabilität, Porosität sowie Porenraumvolumen) und Modellberechnungen ergänzt werden. Außerdem kommen in tonigen Wirtsgesteinen folgende hydrogeologische Untersuchungen zur Analyse der Fließ- und Transportprozesse von Radionukliden zum Einsatz:

- Analyse des Einflusses der Wassersättigung auf die Tonstein-Eigenschaften,
- vergleichende Untersuchungen der Fließ- und Transportprozesse in undeformierten und tektonisch beeinflussten Tonsteinen,
- Analyse des Einflusses lithologischer und fazieller Heterogenitäten auf die hydraulischen und geochemischen Eigenschaften der Wirtsgesteine,
- Langzeitmessungen des Porenwasserflusses und -drucks und spezielle Analyse des Einflusses von hydromechanischen und hydrochemischen Prozessen auf den Porenwasserdruck,
- Untersuchung der Interaktion zwischen hydrogeologischen Parametern im Wirtsgestein und dem Grundwassersystem im Deck- und Nebengebirge (Einfluss von Fazies, Klüften und Störungen),
- maßstabsabhängige Analyse des Einflusses von Porenwasserdruck, lithologischer Anisotropie und Faziesausbildung auf die hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine,
- Analyse der Auswirkungen von gekoppelten Prozessen (THMC) auf die hydraulische Durchlässigkeit sowie
- Studien zur Änderung der hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und geotechnischen Barrieren durch mechanische, thermische und chemische Einflüsse (z.B. Änderung des Porenwasserdrucks, Änderung der Auflockerungszone durch Selbstheilung, Variationen der Mineralogie z. B. durch Alteration der Gesteine), Endlagerbau bzw. Streckenauffahrung, Bewetterung, Korrosion und Wasserzutritt.



Abb. 69: Packersystem zur Durchführung von Permeabilitätsmessungen im Tonstein (Quelle: BGR)

Eine Besonderheit in den hydrogeologischen Eigenschaften von Tonsteinen besteht in der weiten Verbreitung von hydraulischen Anisotropien (Abb. 70). Für die Messung anisotroper Permeabilitätsverteilungen werden Schlitzpacker eingesetzt (Abb. 71).

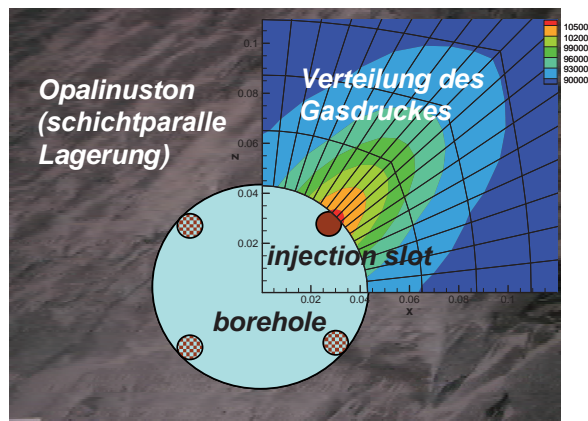


Abb. 70: Nachweis anisotroper Permeabilitäten im Opalinuston des URL Mont Terri (Quelle: BGR)



Abb. 71: Schlitzpacker der BGR zur Bestimmung anisotroper Permeabilitäten im Tonstein (Quelle: BGR)

Hydrochemische Untersuchungen

Ein Untersuchungsschwerpunkt bei der untertägigen Erkundung ist die Analyse der Transportvorgänge für Radionuklide im Tonstein, die auf den Diffusions- und Retentionseigenschaften beruhen und von dem Gefüge und der mineralogischen Zusammensetzung des Tonsteins (Matrix) abhängig sind. Zur Untersuchung der sehr langsamen Diffusionsvorgänge und des geringen Wassergehaltes in Tonsedimenten mussten spezielle In-situ- und Labormethoden entwickelt werden (THURY & BOSSART 1999, RÜBEL et al. 2002, PEARSON et al. 2003).

Zur Analyse dieser Prozesse ist die Durchführung von Langzeitversuchen erforderlich. Dabei werden spezielle Tracer über einen langen Zeitraum mit Packersystemen in isolierte Testintervalle injiziert und Änderungen in ihrer Konzentration erfasst. Für die Versuche in gering permeablen Gesteinen wie Tonstein wurden inerte, konservative Anionen-Tracer, die keine Wechselwirkung mit dem Gestein aufweisen und den Anionenaustausch unterbinden ($^{36}\text{Cl}^-$, $^{125}\text{Cs}^-$) sowie Tracer verwendet, die chemisch mit dem Gestein reagieren (Retention, Li^+ , Na^+ , Cs^+). Nach Abschluss der Injektionsphase werden die injizierten Bereiche überbohrt und die Tracerkonzentration der Proben im Labor untersucht. Um Diffusionsvorgänge in größeren Maßstäben charakterisieren zu können, werden die Ergebnisse der In-situ-Experimente und Laborversuche durch Modellberechnungen ergänzt. Im Rahmen dieser Arbeiten erfolgt auch eine geochemische Charakterisierung der geotechnischen Barrieren.

Diese Untersuchungen gliedern sich in drei Hauptbereiche:

- geochemische und mikrobiologische Charakterisierung des Tonsteins unter besonderer Berücksichtigung der Porenwässer,
- Untersuchung der Diffusions- und Sorptionseigenschaften sowie
- Untersuchung der Gastransporteigenschaften.

Die Transportprozesse und deren Parameter bzw. Einflussgrößen werden unter besonderer Berücksichtigung des Gastransportes untersucht. Hierfür werden Gaspermeabilitätstests in Bohrungen und geophysikalische Untersuchungen zur Detektion von ungesättigten und gesättigten Bereichen durchgeführt, die durch Labortests zur Bestimmung von Kapillardruck, relativer Permeabilität und Porenraumvolumen ergänzt werden. Im Einzelnen werden hierfür folgende Untersuchungen durchgeführt:

- geochemische Charakterisierung der Tonsteine und der Porenwässer zur Analyse des Migrations- und Retentionsverhaltens von Radionukliden und damit zur Bestimmung der Transporteigenschaften und -vorgänge,

- In-situ-Versuche zur Analyse der Transport- und Retentionsmechanismen für Radionuklide,
- Entwicklung von natürlichen Tracern für In-situ-Tracerversuche,
- Analyse des Einflusses thermischer Prozesse auf die Diffusion,
- In-situ-Studien zur Intensität von Transportprozessen durch Kolloide,
- Untersuchungen zu den Auswirkungen von mikrobiologischer Aktivität und osmotischem Druck auf das Migrations- und Retentionsverhalten der Radionuklide,
- Ableitung der chemischen Rückhalte-mechanismen, welche die Langzeitstabilität der ingenieurmäßig erstellten Sicherheitsbarrieren gewährleisten.

Aktuell werden im Felslabor Mont Terri und im Untertagelabor Meuse/Haute Marne zahlreiche Experimente zu hydrogeologischen und hydrochemischen Fragestellungen durchgeführt (ANDRA 2005d). In BOSSART et al. (2008) und NAGRA (2005) sind die speziellen Zielsetzungen, die eingesetzten Methoden und Ergebnisse umfassend dargestellt.

Untersuchung und Analyse der Folgen von Auffahrungs- und Endlager-induzierten Störungen und Prozessen

Da sich in Tonsteinen in Auflockerungszonen im Streckennahbereich und durch Endlager-induzierte Prozesse die physikalischen Eigenschaften der Gesteine deutlich stärker ändern als im Salzgestein oder im Kristallin, stellen Untersuchungen zum Verformungsverhalten des Gebirges und zu den Folgen erhöhter Temperaturen im Umfeld des Einlagerungsbereiches wesentliche Schwerpunkte bei der untertägigen Standorterkundung dar. In Verbindung mit den wirkenden Gebirgsspannungen reagiert das Gestein im Streckennahbereich spröde und es entwickelt sich eine auffahrungsbedingte Auflockerungszone (Excavation Damaged Zone, EDZ und Excavation Disturbed Zone, EdZ). Dadurch ändern sich nicht nur die mechanischen, sondern auch die hydromechanischen und hydrochemischen Eigenschaften der Gesteine.

Um die Auswirkungen der Streckenauffahrung auf das Gebirge und den Streckenausbau zu untersuchen, erfolgt die Instrumentierung des Streckenausbaus mit geomechanischen Messsystemen sofort nach der Auffahrung. Dabei ermöglicht die Bestimmung der Gebirgs- und Gesteinseigenschaften eine Bewertung der Auswirkungen der Bergwerksauffahrungen. Die wesentlichsten Untersuchungsschwerpunkte zur Charakterisierung der Auflockerungszone sind:

- Ermittlung der Gesteinsparameter und Gebirgseigenschaften im Bereich der Auflockerungszone mit hydrogeologischen, geomechanischen und geophysikalischen Methoden
 - Instrumentierung des Streckenausbaus mit geomechanischen Messsystemen,
 - Analyse der Gebirgsdeformation im Streckenbereich (u. a. durch Konvergenzmessungen),
 - strukturgeologische Charakterisierung der Auflockerungszone (qualitative und quantitative Analyse der Trennflächenbildung),
 - Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften der EDZ (hydraulische und Gaspermeabilität, Fließwege, Transportparameter, Porenwasserdruck),
 - Untersuchungen zur Selbstheilung von Trennflächen,
 - Analyse der Gebirgsdeformation aufgrund der Bewetterung,
- Unterbrechung der EDZ mit geotechnischen Barrieren (Erstellung von Schlitzten um Strecken und ihre Verfüllung mit Bentonit)
 - Charakterisierung der Barriereigenschaften der geotechnischen Barriere,
 - Test von Funktion und Wirksamkeit der geotechnischen Barriere sowie
 - Bestimmung der Transporteigenschaften für Gase und Radionuklide in der geotechnischen Barriere.
- Analyse der Auswirkungen von gekoppelten Prozessen (hydromechanische, hydrochemische und thermo-hydraulisch-mechanisch-chemische Prozesse) auf die hydraulische Durchlässigkeit sowie
- Studien zur Änderung der hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und geotechnischen Barrieren durch mechanische, thermische und chemische Einflüsse (z. B. Änderung des Porenwasserdrucks, Änderung der Auflockerungszone durch Selbstheilung, Variationen der Mineralogie z. B. durch Alteration der Gesteine), Endlagerbau bzw. Streckenauffahrung, Bewetterung, Korrosion und Wasserzutritt.

Die Ausdehnung der Auflockerungszone wird vor allem mit geophysikalischen Methoden, wie z.B. Ultraschall- oder geoelektrische Messungen (Abb. 72) bestimmt, während ihre Eigenschaften durch entsprechende hydraulische und geotechnische Untersuchungen ermittelt werden. Ergänzend werden zahlreiche geomechanische Labortests zur Bestimmung von felsmechanischen Parametern und Deformationseigenschaften durchgeführt.

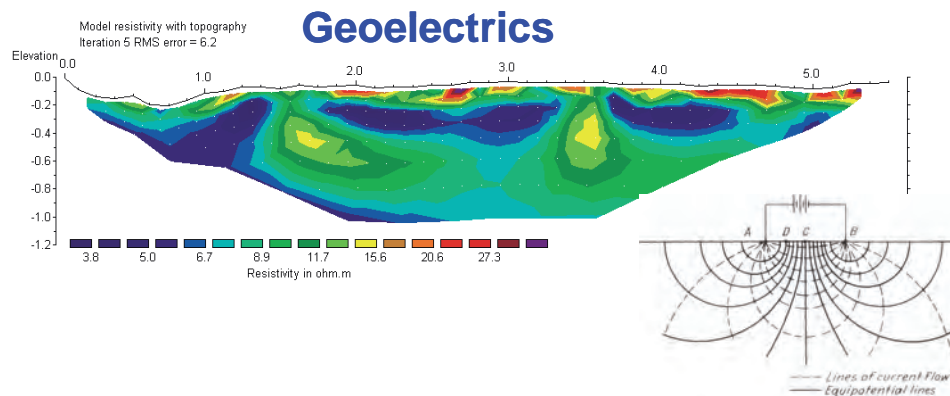


Abb. 72: Beispiel für die Anwendung geoelektrischer Messungen zur Analyse der EDZ (URL Mont Terri, Quelle: BGR)

Durch die Streckenauffahrung, die Bewetterung und die in das Endlager eingebrachten Materialien (z. B. Container, Versatz und Dammbauwerke) erfolgen auch Störungen der natürlichen geochemischen Bedingungen. Zu deren Charakterisierung werden Untersuchungen zu folgenden Themenstellungen durchgeführt:

- chemische und physikalische Verwitterung der Wirtsgesteine,
- Einfluss des Zementwassers auf das geochemische Milieu und die im Nahfeld ablaufenden Prozesse,
- Zement-Ton-Wechselwirkungen sowie
- Bitumen-Nitrat-Ton-Wechselwirkungen.

Gekoppelte Prozesse

Für die Analyse des Gebirgsverhaltens ist es nicht ausreichend, die geologischen, mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und die Einflussfaktoren auf die endlagerrelevanten Prozesse losgelöst voneinander zu untersuchen. Für die Einschätzung der Langzeitsicherheit von Endlagerprojekten in Tonsteinen führt nur die zusammenfassende Auswertung aller, zu dieser Fragestellung durchgeführten Experimente zu Erkenntnisfortschritt. Deshalb sind komplexe Untersuchungen der thermo-

hydro-mechanisch-chemischen Prozesse (THMC) von besonderer Bedeutung (siehe z. B. WIECZOREK et al. 2007). Beispiele für die dafür erforderliche Synthese verschiedener interdisziplinärer Untersuchungsmethoden sind:

- Mine-by-Test zur Bestimmung von Änderungen der Gebirgseigenschaften und des Gebirgsverhaltens infolge von Streckenauffahrungen (Charakterisierung der Auflockerungszone, Deformationsverhalten, Entwässerung, Rissentwicklung, Oxidation etc.) in Verbindung mit unterschiedlichen Auffahrungstechniken und Ausbaumethoden,
- Ventilations-Tests: Untersuchungen zur Feuchteumverteilung (mittels geoelektrischer Messungen) und gekoppelte Analyse geomechanischer, hydraulischer und geochemischer Prozesse zwecks Bewertung der Auswirkungen der Bewetterung,
- Erhitzerversuche zur komplexen Charakterisierung des Gebirges bei der Analyse der Auswirkungen thermischer Belastungen mittels gekoppelter THMC-Prozesse (z. B. POLSTER & JOBMANN 2006),
- Engineered Barriers-Experimente inklusive "Self sealing" zur Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Eigenschaften und Wirksamkeit von geotechnischen Barrieren (z. B. kleinräumiger Laugeninjektionsversuch mit geoelektrischer Überwachung).

In Abb. 73 ist am Beispiel eines Erhitzerversuches dargestellt, wie derartige interdisziplinäre Versuche geplant bzw. aufgesplittet und realisiert werden. Die in dieser Abbildung gegebene Versuchsbeschreibung beinhaltet nur Teilbereiche dieses Versuches. Andere Teilaspekte wurden in weiteren Experimenten abgehandelt.

Heater Experiment, HE

<p>1. Objective: Identification and measurement of THM responseS in both the buffer and the host rock, with special emphasis on the host rock/buffer interaction.</p> <p>2. Concept: Install, in a 30 cm diameter borehole, a heater, a hydration system and a clay buffer (with some water content, temperature and total pressure probes). Drill and instrument 19 boreholes to observe the rock response to hydration and heating. The system will be heated to a temperature of 100°C at the heater-clay buffer contact. After heating and cooling, the experiment will be dismantled. Numerical modelling is run throughout the heating phase and laboratory tests are performed to determine the mechanical properties of the host rock and buffer before and after heating.</p>																																																																																																																																																							
<p>3. Responsibilities <i>Experiment Partners:</i> ANDRA, ENRESA, GRS <i>PI: Name(s), organisation(s):</i> Fernando Huertas (Enresa), <i>Key contractors:</i> Aitemin (instrumentation and monitoring), Coreis (drilling), GI (site support, geological mapping), CIMNE (modelling).</p>																																																																																																																																																							
<p>4. Key activities</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>96</th> <th>97</th> <th>98</th> <th>99</th> <th>00</th> <th>01</th> <th>02</th> <th>03</th> <th>04</th> <th>05</th> <th>06</th> <th>07</th> <th>08</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>General design and engineering</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Preparation of components and site</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Borehole drilling</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Test installation and artificial hydration</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Heating and cooling</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Monitoring</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Laboratory testing</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dismantling</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Modelling and interpretation</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>													96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	General design and engineering														Preparation of components and site														Borehole drilling														Test installation and artificial hydration														Heating and cooling														Monitoring														Laboratory testing														Dismantling														Modelling and interpretation													
	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08																																																																																																																																										
General design and engineering																																																																																																																																																							
Preparation of components and site																																																																																																																																																							
Borehole drilling																																																																																																																																																							
Test installation and artificial hydration																																																																																																																																																							
Heating and cooling																																																																																																																																																							
Monitoring																																																																																																																																																							
Laboratory testing																																																																																																																																																							
Dismantling																																																																																																																																																							
Modelling and interpretation																																																																																																																																																							
<p>5. Key results: The HE experiment was carried out in the Mont Terri rock laboratory in the HE Niche (shaly facies of Opalinus Clay). The central vertical borehole BHE-0 with 300 mm diameter and 7.5 m depth was drilled in the niche floor. Heat-producing waste was simulated by a 2 m long heater element with 10 cm diameter, installed in BHE-0 between 4 and 6 m. It was embedded in a geotechnical barrier of ring-shaped compacted bentonite blocks with an outer diameter of 30 cm and a density of 1.8 g/cm³. A total of 19 boreholes were drilled in the niche floor for rock instrumentation purposes. Sensors for measuring the most relevant rock parameters, such as temperature, humidity, mechanical pressure, pore pressure, displacements and electrical resistivity, as well as devices to determine gas and water release, were installed in the boreholes. The experiment was designed for automatic, unattended operation, with remote supervision of the measurements. An artificial hydration system was installed to accelerate the hydration process in the bentonite buffer prior to the heating phase. The water used was synthetic experimental water (Pearson water A1 type), which is chemically similar to the water in the Opalinus Clay formation. The irrigation lasted for 35 months before the heating phase (duration of 18 months) began. Already during the hydration phase, several sensors (thermocouples, total pressure cells, pore pressure sensors) failed and had to be replaced. The first phase of heating was carried out in different constant power steps to adjust the parameters of the temperature control loop, reaching a maximum temperature in the bentonite blocks of about 68 °C. Afterwards, the temperature control loop was adjusted with the data obtained. The power applied to the heater was automatically regulated to a constant temperature of 100 °C at the contact between heater and bentonite buffer. After the heater was switched off, the system cooled down quickly. After about a month, the maximum temperature of 40 °C allowed access for dismantling. To identify potential changes in rock properties induced by the experiment, field investigations were performed during the cooling period, consisting of hydraulic, geotechnical, and seismic tests. Additionally, rock mechanic specimens were tested in the laboratory.</p>																																																																																																																																																							
<p>6. Documentation Technical Reports (TR): TR98-02, TR98-03, TR 00-06 Technical Notes (TN): TN 98-27, TN 98-27 (rev), TN 98-28, TN 98-36, TN 99-84, TN 00-01, TN 00-31, TN 00-47, TN 01-03, TN 01-04, TN 01-04 (rev), TN 01-09, TN 01-20, TN 01-24</p>																																																																																																																																																							

Abb. 73: Kurzbeschreibung des Heater-Experiments in Mont Terri (BOSSART & THURY 2008)

Wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen zur Beurteilung des Einflusses komplexer Prozesse auf die Eigenschaften des Multibarrierensystems sind Modellberechnungen, in die die Ergebnisse der In-situ- und Laborversuche eingehen. Aufgrund der Kompliziertheit der gekoppelten Prozesse müssen die z. Zt. international vorhandenen Rechencodes und Stoffgesetze für Tonstein intensiv weiterentwickelt werden.

Untersuchungen zur Optimierung des Endlagerbaus und des Endlagerkonzeptes (konzeptbezogene Untersuchungen)

Da im Tonstein nur geringe Erfahrungen aus dem Bergbau existieren, müssen im Rahmen der untertägigen Standorterkundung umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung der Streckenauffahrung und des Streckenausbaus sowie zur Charakterisierung ihrer Auswirkungen auf das Wirtsgestein und seine Barriereigenschaften durchgeführt werden. Zudem müssen die auf den Tonstein am untersuchten Standort ausgerichteten Einlagerungskonzepte hinsichtlich ihrer Machbarkeit überprüft werden. Hierzu müssen "Demonstrationsversuche" im Maßstab 1:1 durchgeführt werden. Weitere konzeptbezogene Untersuchungen sind:

- Test von Verschlusskonzepten für Bohrungen, Strecken und Schächte,
- Untersuchungen zur Einbringung und Wirksamkeit geotechnischer Barrieren,
- Analyse der Wechselwirkungen zwischen Tonstein, eingebrachten Ausbau- und Versatz- bzw. Verfüllmaterialien sowie Endlagerbehältern,
- Charakterisierung der Langzeitwirkung von Zementwässern und der Wechselwirkung zwischen Verfüllmaterialien und dem Tonstein sowie
- Studium der Auswirkungen der Korrosion von Materialien auf die Langzeitsicherheit des Endlagers.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchungen werden Methoden zum Langzeitmonitoring entwickelt und unter In-situ-Bedingungen erprobt.

3.2.2.4 Beispiele für untertägige Standorterkundungen in Tonsteinen

Die spezifischen Ziele, Fragestellungen und Methoden untertägiger Standorterkundungen in tonigen Gesteinen werden im Folgenden am Beispiel der Arbeiten in den URL's Mont Terri, Schweiz und Meuse/Haute-Marne, Frankreich dargestellt. Im Felslabor Mont Terri wurde bereits 1995 in Zusammenarbeit mit der OECD ein erstes Versuchsprogramm zur Erkundung der Gebirgseigenschaften von Tonen aufgelegt. Die Auffahrung der Strecken begann 1996. Um im Untertagelabor Projekte und Experimente zur Charakterisierung von Tonstein als Wirtsgestein für die Einlagerung radioaktiver Abfälle durchzuführen, wurde ein Konsortium unter Beteiligung internationaler Partner (BGR, ENRESA, NAGRA, IRSN etc.) gegründet. Bis 2009 wurden im Felslabor Mont Terri, das kontinuierlich für die Durchführung ergänzender In-situ-Studien erweitert wurde bzw. wird (Abb. 74), 78 wissenschaftliche Experimente bzw. Projekte durchgeführt.

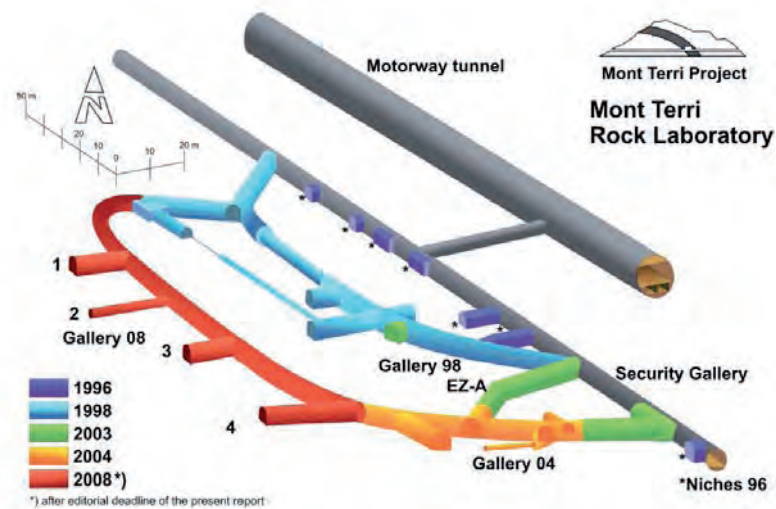


Abb. 74: Anordnung der Versuchsorte und zeitlicher Verlauf der im Felslabor Mont Terri bis Ende 2008 durchgeführten In-situ-Messungen bzw. -Experimente (BOSSART & THURY 2008)

Der 10-Jahresbericht zum Mont Terri-Projekt (BOSSART & THURY 2008) fasst die Ziele und Ergebnisse sowie Methoden der im Felslabor Mont Terri durchgeführten Untersuchungen zusammen. Die Mehrheit der 78 realisierten Experimente wurde durch interdisziplinäre, meist international zusammengesetzte Arbeitsgruppen durchgeführt. Tabelle 5 stellt eine zusammenfassende Übersicht dieser Experimente dar.

Mit diesen Experimenten sollen die Untersuchungen im Felslabor Mont Terri fortgeführt werden, um die komplexen Vorgänge im System Endlager/Tonstein besser zu verstehen und die vorhandenen Kenntnisse weiter auszubauen.

Die Untersuchungen im URL Meuse/Haute Marne basieren auf den im Felslabor Mont Terri ab 1996 gesammelten Erfahrungen. Der Betreiber dieses URL (ANDRA) war an vielen der in Mont Terri durchgeführten Untersuchungen beteiligt und hat einen Großteil der dort entwickelten bzw. getesteten Methoden inzwischen im Felslabor Meuse/Haute-Marne angewendet. Partiiell gehen die Untersuchungen jedoch darüber hinaus, da am Standort Meuse/Haute-Marne die Standorterkundung/-charakterisierung das Ziel hat, einen potenziellen Endlagerstandort zu beurteilen. Das URL Mont Terri ist ein „generisches“ URL, an dessen Standort keine Endlagerung möglich ist.

Tab. 5: Übersicht zu den Schlüsselthemen der im URL Mont Terri durchgeführten Experimente bzw. Untersuchungen (BOSSART & THURY 2008)

Understanding processes and mechanisms in undisturbed clays
Improvement of drilling and excavation technologies and testing of sampling methods, with the aim of minimising perturbations to the rock.
Estimation of hydrogeological, rock mechanical and geochemical parameters of the undisturbed Opalinus Clay. Upscaling of parameters from laboratory to in situ scale (metre to hundred metre range).
Geochemistry of porewater and natural gases; evolution of porewater over geological timescales.
Assessment of long-term hydraulic transients associated with erosion and thermal scenarios.
Evaluation of diffusion and retention parameters for long-lived radionuclides.
Experiments related to repository-induced perturbations
Influence of rock liner on the disposal system, buffering potential of the host rock, time dependent processes.
Self-sealing processes in the excavation damaged zone, from small scale to repository scale.
Hydro-mechanical coupled processes (e.g. stress redistributions and pore pressure evolution during mine-by testing).
Thermo-hydro-mechanical-chemical coupled processes (e.g. heating of bentonite and host rock).
Gas-induced transport of radionuclides in porewater, gas transport along interfaces in the engineered barrier system.
Experiments related to demonstrating repository performance during operation and post-closure include
Construction and installation of engineered barriers on a 1:1 scale.
Horizontal emplacement of canisters; remote handling.
Evaluation of the corrosion of container materials; repository resaturation.
Sealing of boreholes and repository access tunnels and shafts.
Long-term monitoring of the repository.

Die Schwerpunkte des wissenschaftlichen Untersuchungsprogramms der ANDRA, das seit 2001 im Untertagelabor Meuse/Haute Marne durchgeführt wird, entsprechen den in Kap. 3.2.2.3 genannten Untersuchungszielen und sind dort bereits detailliert aufgeführt. Ähnlich wie in der Schweiz wurden zur Charakterisierung komplexer Fragestellungen zahlreiche wissenschaftliche Versuche unterschiedlicher Disziplinen zusammengefasst bzw. im Umfeld dieser Versuche so viele wie möglich messtechnisch erfassbare Gesteinsparameter bestimmt.

Am Standort Meuse/Haute Marne wurden zur Untersuchung des geologischen Baus, der Zusammensetzung und der Eigenschaften der tonigen Wirtsgesteinsformation im Rahmen der Errichtung des Untertagelabors zwei Schächte mit einer Teufe von jeweils ca. 510 m abgeteuft. Die beiden Schächte sind ca. 100 m voneinander entfernt. Zur Erkundung der Lokationen für das Abteufen der Schächte wurde je eine Vorbohrung niedergebracht. Die Arbeiten am Hauptschacht (PA) begannen im August 2000 und am Hilfsschacht (PX) im November 2000. Ende 2005 wurden jeweils die Endteufen erreicht. Das Schachtabteufen erfolgte im Sprengvortrieb. Der Ausbau besteht aus einer Betonschale und wurde Ende 2006 fertig gestellt. Neben der geologischen Kartierung der Schächte und Tests zur Optimierung des Sprengvortriebs im Bereich verschiedener Gesteinstypen wurden in einzelnen Messabschnitten Bestimmungen der felsmechanischen Gebirgseigenschaften (z. B. Konvergenzmessungen) und Untersuchungen zur Detektion der Auflockerungszone durchgeführt.

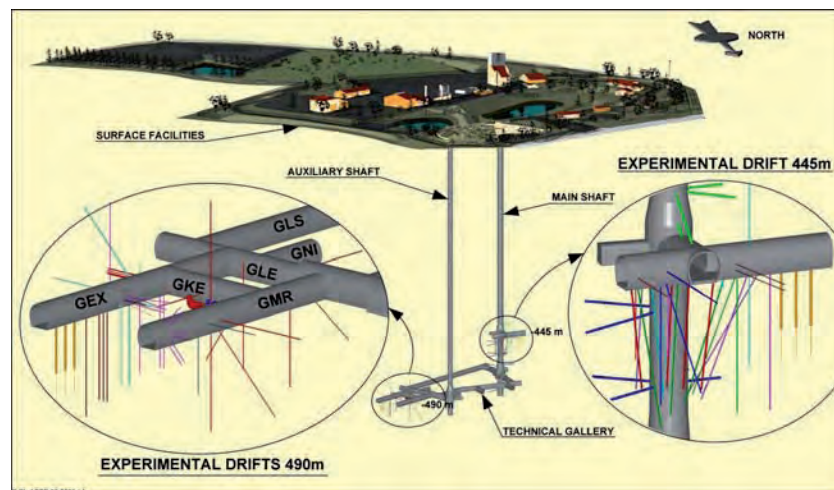


Abb. 75: Schema zum Aufbau des Untertagelabors Bure und zu den durchgeführten geologisch-geotechnischen Erkundungsmaßnahmen (rechts – Erkundungsnische in 445 m Tiefe; links – Ausschnitt des Erkundungsbergwerkes auf der -490 m-Sohle, Quelle: ANDRA)

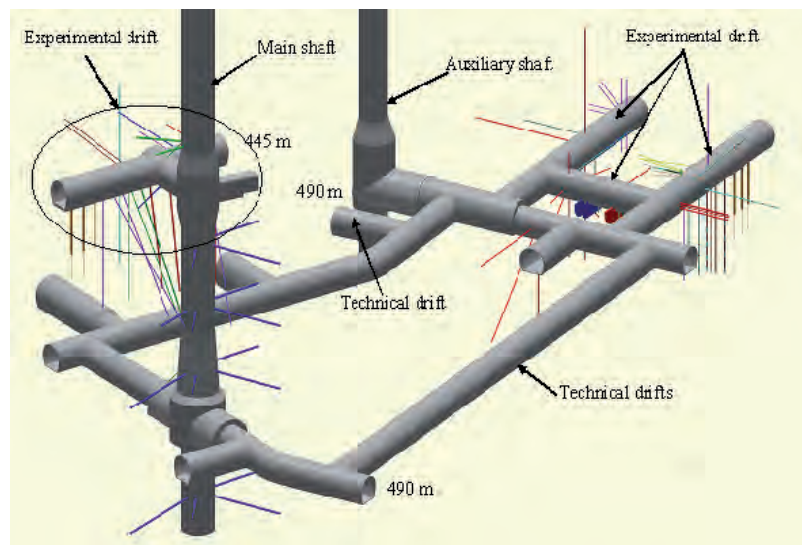


Abb. 76: Vergrößerte schematische 3D-Darstellung der Auffahrungen und Bohrungen für die untertägige Erkundung des Standortes Meuse/Haute Marne (Quelle: ANDRA)

Vom Hauptschacht aus wurde im Jahr 2004 auf - 445 m eine 40 m lange Versuchsnische aufgeföhren, in der 36 Bohrungen für wissenschaftliche Versuche gestoßen wurden (Abb. 75 und 76). Der Hauptteil des wissenschaftlichen Erkundungsprogramms des Callovo-Oxfordian wurde ab Ende 2004 zunächst überwiegend in dieser Versuchsnische durchgeführt. Nach dem Erreichen des Hauptniveaus bei - 490 m wurden vom Hilfsschacht aus mehrere Versuchsstrecken im potenziellen Einlagerungsniveau des Callovo-Oxfordian-Tons aufgeföhren, in denen eine Vielzahl von wissenschaftlichen Versuchen zur Gesteins- und Standortcharakterisierung durchgeführt wurden (Abb. 75 und 76).

Die erste Phase der wissenschaftlichen Versuche wurde in den beiden Schächten, in der Versuchsnische und im Bereich des Hauptniveaus, vor allem in den Gallerien GLE, GMR, GKE und GEX durchgeführt (siehe Abb. 80). Die Zielsetzungen der untertägigen Standorterkundung am Standort Meuse/Haute sind in Kap. 3.2.2.3 ausführlich dargestellt. Hauptziel der Arbeiten war es, die vorhandenen Kenntnisse über den Callovo-Oxfordian-Tonstein zu vertiefen und durch umfangreiche In-situ-Tests standortbezogene Daten zu den Wirtsgesteinseigenschaften und zur praktischen Umsetzung des Endlagerkonzeptes zu gewinnen. Hierfür wurden die in Abb. 77 aufgeführten Schlüsselexperimente durchgeführt. Für Kurz- und Langzeitversuche wurden bisher insgesamt mehr als 160 Bohrungen realisiert.

	<i>Experiments</i>	<i>Type of scientific work</i>	<i>Chronology</i>
Shaft sinking	Geological observations	Description of intercepted layers; survey of fractures and geological objects encountered	Observations made while sinking since August 2000
	Measurement of exhaure water flow rates in the shafts	Collection of the water flowing from the shaft walls at each producing level in the Oxfordian and measurement of flow rates	Measurement carried out in the Oxfordian limestones since February 2002
	Geotechnical measurements	Measurements of deformation in shaft walls and argillite, characterisation of the damaged zone in 4 instrumented zones (SMGR) between -450 and -500m	Measurements carried out at regular intervals, while sinking from August 2001 up to the first half of 2005
	REP (Response of the rock to shaft sinking))	Instrumentation of a volume of rock intercepted by the main shaft to measure the state of the rock before sinking, then the disturbances during and after	Instrumentation installed at the end of 2004 – beginning of 2005, continuous monitoring of sinking and deferred effects since the 2nd quarter of 2005
Drift -445meters	Geotechnical measurements	Measurement of deformation (SMC) of drift walls and in the argillite, characterisation of the excavation damaged zone EDZ	Measurements carried out while excavating the drifts (4th quarter of 2004) and monitoring since then
	PEP (Permeability and Pressure)	Measurements to confirm the permeability of the argillite and additional hydraulic head measurement	Measurement made in the 1rst quarter 2005
	PAC (Samples for chemical analysis)	Geochemical analyses and partial gas pressure measurement (pCO ₂) to obtain the chemical components of argillite water	Instrumentation installed at the end of 2004 – beginning of 2005, Then regular sampling to carry out chemical analyses and tracer monitoring
	DIR (Diffusion and Retention)	Diffusion measurement (different tracers) in the argillite	
Drifts -490 meters	Geotechnical measurements	Same as for drift at -445 m	Measurements carried out during excavation work (2nd & 3rd quarter) and monitoring after that
	KEY	Full-scale test to create cut off grooves in the damaged zone, fill them with swelling clay then measure their performance levels	Technological test carried out in summer 2005 and measurements of the bentonite until September. Hydration and performance monitoring since September 2005
	PEP	Same as for the shift at -445 m and measuring the effects of hydro-mechanical and osmotic couplings	Equipping with instrumentation and measurements in October 2005 followed by continuous monitoring
	PAC	Same as for drift at -445 m	Installation in October, followed by an equilibration phase and the injection of tracers at the end of 2005, then continuous monitoring
	DIR	Creep measurements with a dilatometer	
	GIS (Geomechanical <i>in situ</i>)	Creep measurements with a dilatometer	Measurements made in October then continuous monitoring
	TER	Thermal conductivity measurement of the argillite	Instrumentation installed in October and November 2005, followed by continuous monitoring

Abb. 77: Schlüsselexperimente im URL Meuse/Haute Marne, Phase I (Quelle: ANDRA)



Abb. 78: Durchführung von Ultraschallmessungen zur Erkundung der Auflockerungszone im URL Meuse/Haute Marne (Quelle: BGR)

Komplettiert werden diese Arbeiten durch zahlreiche Studien zum Endlagerkonzept und zur Bergbautechnologie. Da keine Erfahrungen aus dem Bergbau existieren, müssen umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung der Auffahrungsmethoden, der Streckenform, -größe und -orientierung und des Streckenausbaus sowie zur Charakterisierung ihrer Auswirkungen auf die Barriereigenschaften der Wirtsgesteine durchgeführt werden.

Zur Bestimmung der Durchlässigkeiten der Tongesteine des Callovo-Oxfordian sowie zur Charakterisierung der Permeabilität der Auflockerungszone im Streckennahbereich (EDZ) wurden im Rahmen der verschiedenen geowissenschaftlichen Experimente in zahlreichen Bohrungen Packertests durchgeführt (Abb. 79), z. T. in Verbindung mit Ultraschallmessungen (Abb. 78). Ergänzt wurden diese Versuche durch Tracertests und Modellrechnungen zum Radionuklidtransport.

Die Packertests (Pulstest, Drucktest) wurden i.d.R. mit Gas durchgeführt. Die Ergebnisse der In-situ-Untersuchungen zeigen, dass die Permeabilität im Nahbereich der Strecken durch die entstandene Auflockerungszone deutlich ansteigt. Im Durchschnitt beträgt die Permeabilität, die in diesem Bereich an Trennflächen gebunden ist, zwischen 10^{-12} bis 10^{-14} m². In der Übergangszone zum ungestörten Gebirge verringert sie sich von 10^{-14} auf ca. 10^{-18} m². Im ungestörten Gebirge beträgt die Permeabilität zwischen 10^{-19} und 10^{-21} m².



Abb. 79: Durchführung hydraulischer Tests mittels Mehrfachpacker im URL Bure (Quelle: BGR)

Im Rahmen der untertägigen Standorterkundung erfolgen umfangreiche geochemische Untersuchungen. Im Mittelpunkt stehen dabei:

- Bestimmungen der Gehalte und räumlichen Verteilung der chemischen Elemente in den Gesteinen zwecks Beurteilung ihrer physikalisch/chemischen Eigenschaften, ihrer Wechselwirkungen mit den einzulagernden radioaktiven Abfällen und für spezielle Fragestellungen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse,
- Analysen der Sorptionseigenschaften der Minerale,
- Studien zur chemischen Zusammensetzung und zur Charakterisierung des Porenwassers,
- Entwicklung von thermodynamischen Modellen sowie
- Ableitung der chemischen Rückhalte-mechanismen, welche die Langzeitstabilität der ingenieurmäßig erstellten Sicherheitsbarrieren gewährleisten.

Die Arbeiten der Phase I wurden 2005 planmäßig abgeschlossen (ANDRA 2005b).

Zur Fortsetzung des Untersuchungsprogramms sollen bis 2012 mehr als 800 m neue Strecken (Abb. 80) und mehr als 200 neue Bohrungen (Abb. 81) für wissenschaftliche Versuche gestoßen werden.

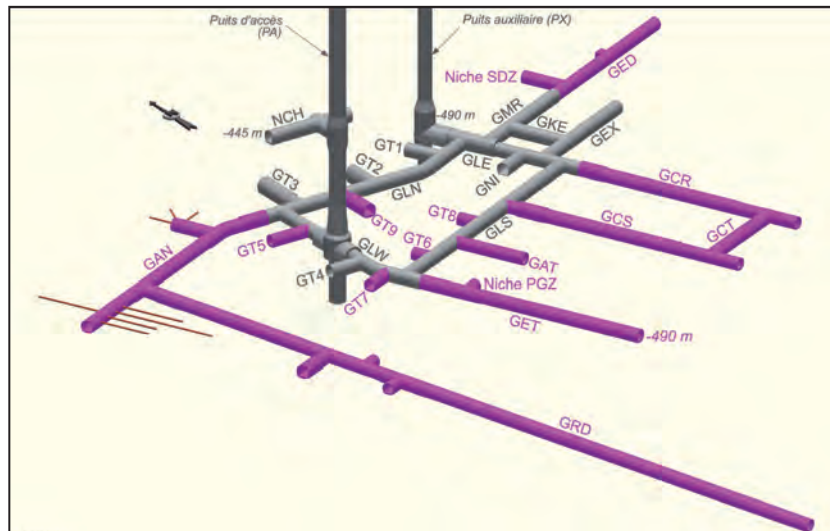


Abb. 80: Geplante Streckenauffahrungen (magenta) in Phase II im URL Meuse/Haute-Marne (Quelle: ANDRA)

In der bis 2012 geplanten Phase II sollen die o. a. Versuche überwiegend fortgesetzt werden. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte des geplanten Untersuchungsprogramms der ANDRA sind:

- vertiefte Charakterisierung der physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften,
 - Permeabilitäts- und Porenwasserdruckuntersuchungen,
 - Porenwassercharakterisierung,
 - Untersuchung der Diffusions- und Retentionsvorgänge,
- Charakterisierung von Effekten durch die Auffahrung und den Betrieb des URL,
 - Reaktion des Tonsteins auf die Auffahrung und Charakterisierung der EDZ,
 - Chemische Veränderungen infolge der Bewetterung und des eingebrachten Materials (Wechselwirkungen, Korrosion, Gasentwicklung etc.),
- Vertiefung der Kenntnisse über die strukturgeologischen und hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine,

- Versuche zur technischen Umsetzung der Einlagerungskonzepte im Maßstab 1:1,
- Untersuchungen zur Wirksamkeit geotechnischer Barrieren.

In Tab. 6 ist eine Übersicht zu den in Phase II (2008 bis 2012) geplanten wissenschaftlichen Versuchen dargestellt. Die Versuche aus Phase I (Abb. 77) werden z. T. in die aufgeführten Experimente übergeleitet.

Tab. 6: Übersicht über die im Zeitraum 2008 bis 2012 geplanten wissenschaftlichen Versuche im Untertagelabor Meuse/Haute Marne (Quelle: ANDRA)

ACC	Accelerometer measurements
BAC	Bacteriological perturbation
CAC	Behavior of C cells
CDZ	Mechanical compression of the EDZ
DRN	Dispersion of radionuclides
GIS	in situ geomechanics
MAG	Resaturation and insulation of the clay plug
MCO	Corrosion of iron materials
MLH	Rock – hydraulic binders interaction
MVE	Behavior of glass
OHZ	Observation and hydromechanical follow up of the works
ORS	Observation an behavior of the works
PAC	Sampling and chemical analyses
PGZ	HM perturbation induced by gas
POX	Oxidizing perturbation
SDZ	Effect of saturation desaturation of the EDZ
TED	Thermal disturbance
TSS	Shaft sealing and slot test

In Abb. 81 sind die geplanten Bohrungen für die vorgesehenen In-situ-Versuche in der Gallerie GED dargestellt. Die Anzahl und Dichte der Bohrungen verdeutlicht das umfangreiche Untersuchungsprogramm.

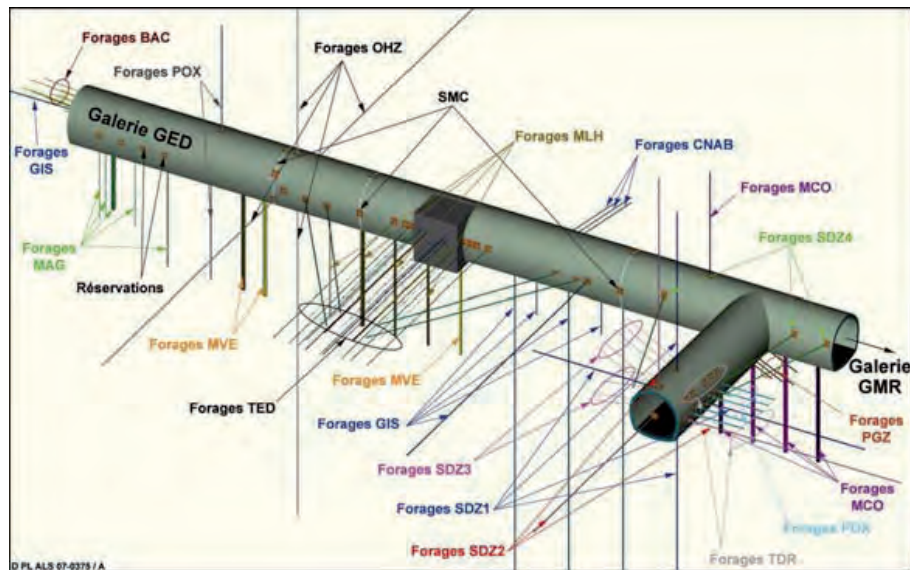


Abb. 81: Planung von Experimenten in der Galerie GED im URL Meuse/Haute Marne (Quelle: ANDRA)

3.2.2.5 Untertägige Standorterkundung im Kristallin

Zur Bewertung der Eignung von Standorten in kristallinen Gesteinen für die Endlagerung hochradioaktiver, Wärme produzierender Abfälle sind im Ergebnis untertägiger Erkundungsarbeiten detaillierte Informationen zu folgenden Themenschwerpunkten erforderlich:

- Abgrenzung bzw. Ausweisung von möglichst ungeklüfteten homogenen Gebirgsbereichen,
- umfassende struktureologische Charakterisierung des Wirtsgesteins in verschiedenen Maßstäben, insbesondere Daten zur räumlichen Orientierung und Vernetzung von Kluft- und Störungssystemen und zu ihren Eigenschaften, zur Klüftigkeit und Einschussführung der Wirtsgesteine sowie zur Anisotropie in der Zusammensetzung und in den endlagerrelevanten Eigenschaften der Gesteine,
- In-situ-Untersuchungsergebnisse zu den hydrogeologischen Standortbedingungen, wie z. B. Grundwasserführung und hydraulische Eigenschaften der Gesteine im geplanten Einlagerungsbereich bzw. im Nahfeld des Endlagers; Vorkommen und räumliche Verteilung von möglicherweise hydraulisch aktiven, untereinander vernetzten Störungszonen bzw. Grundwasserfließwegen im Nah- und Fernfeld des geplanten Endlagers; Erkundungsbefunde zur Morphologie, Entwicklungsgeschichte, Vernetzung, zu Kluftbelägen und -öffnungsweiten sowie zu den hydrau-

lischen Eigenschaften (wie z. B. Gebirgsdurchlässigkeiten, hydraulische Gradienten und Grundwasserfließgeschwindigkeiten) der aktuell und der möglicherweise perspektivisch hydraulisch aktiven Störungszonen; Informationen zum Vorkommen von Grundwasserstauern oberhalb des Einlagerungsniveaus,

- geochemisch-isotopengeochemische Angaben zu den im Erkundungsbergwerk bzw. im Endlager festgestellten Wasserzuflüssen (ein Beispiel für eine umfassende Charakterisierung von Grundwasserzutritten in ein Erkundungsbergwerk ist das Lösungskataster Gorleben, BfS 2002, SCHRAMM et al. 2009); Daten zur Herkunft und zum Alter der Grundwässer,
- belastbare Informationen zu den Spannungsverteilungen innerhalb des Gesteinsmassivs im Bereich des geplanten Endlagers, zur Änderung des Spannungsfeldes mit der Teufe und in lateraler Richtung; Abschätzung von Senkungs- bzw. Hebungsgeschwindigkeiten einzelner Gesteinsblöcke im Umfeld von Störungszonen, die den Endlagerbereich queren; Einschätzungen der weiteren Entwicklung der Spannungsverteilungen, inklusive möglicher Umorientierungen der Spannungsvektoren unter dem Einfluss geodynamischer Prozesse in benachbarten Regionen oder ausgehend von der Errichtung des Endlagerbergwerkes,
- detaillierte Angaben zu den geochemisch-mineralogischen, physikomechanischen, wärmephysikalischen, Filtrations-, Diffusions- und Sorptions- bzw. Retardationseigenschaften der Wirtsgesteine (inklusive Gehalte von Kolloiden und Komplexbildnern) und zur räumlichen Verteilung von Gesteinen mit unterschiedlichen endlagerrelevanten Eigenschaften (z. B. Anisotropie in der Wärmeleitfähigkeit und in der hydraulischen Durchlässigkeit),
- Untersuchungen zur Auflockerungszone im Streckennahbereich (EDZ)
- konzeptbezogene Untersuchungen zur Wechselwirkung von eingebrachten Materialien mit dem Gebirge. Durch den Kontakt mit dem Gebirge und Wässern treten physikalisch-chemische Veränderungen an Endlagerbehältern, Verschlussmaterialien und an dem für den Streckenausbau verwendeten Material auf. Durch Korrosion, Radiolyse, Lösungsvorgänge etc. können Veränderungen im geochemischen Milieu ausgelöst werden, die sich auf Transportvorgänge (Diffusion und Advektion) von Radionukliden auswirken können und deshalb untersucht werden müssen.
- Untersuchungen zur Wirkung und zu den Eigenschaften geotechnischer Barrieren.

Ausgehend von den in Skandinavien, Kanada, Russland und in der Schweiz durchgeführten untertägigen Standorterkundungsarbeiten im Kristallin konzentrieren sich die Arbeiten auf strukturgeologisch-hydrogeologische Untersuchungen sowie auf gebirgsmechanische In-situ-Studien. Sie dienen zur Erfassung und Bewertung der räumlichen Lage, Ausbildung, Teufenerstreckung, des Vernetzungsgrades und der hydraulischen Durchlässigkeit von Störungszonen bzw. Klüften, Schieferungs- bzw. Schichtungsflächen (in metamorph überprägten Magmatiten oder Parametamorphiten) und lithologischen Kontakten (z. B. magmatische Gänge, Einschlüsse).

Kristalline Gesteine weisen im ungestörten Zustand sehr geringe Matrixdurchlässigkeiten (meist kleiner 10^{-19} m/s) auf. Im Gegensatz zum plastischen Verhalten von Salzen neigen sie allerdings bei mechanischer Beanspruchung, d. h. bei starker metamorpher bzw. tektonischer Überprägung, aufgrund ihres Spröbruchverhaltens zur Ausbildung von Bruchformen bzw. Klüften, d. h. von potenziellen Grundwassermigrationsbahnen. In der Realität sind kristalline Gesteine daher meist durch miteinander vernetzte Kluff- und Störungssysteme charakterisiert. Im Unterschied zum Steinsalz oder plastischen Tongestein unterliegen die Klüfte, abgesehen von der Bildung von Alterationsprodukten und vom möglichen Verschließen der Hohlräume bei tektonisch bedingten Änderungen der Spannungsverteilungen im Gesteinsmassiv, keiner Selbstheilung.

Trotz generell mit der Teufe abnehmender Durchlässigkeiten können in kristallinen Gesteinen in endlagerrelevanten Tiefenbereichen stark wasserdurchlässige Störungszonen vorkommen, die ein eingeschränktes Isolationspotenzial der geologischen Barriere zur Folge haben können. Im Ergebnis der untertägigen Standorterkundungsarbeiten muss nachgewiesen werden, dass die Gesteine im geplanten Einlagerungsbereich nur einen geringen tektonischen Gestörtheitsgrad aufweisen und Grundwassermigrationspfade weitgehend fehlen. Weitere Schwerpunkte der Erkundungsarbeiten sind Analysen des Gebirgsspannungsfeldes sowie der texturell-strukturellen, thermischen und physikomechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteine im Bereich des geplanten Einlagerungsniveaus (siehe z. B. das Untersuchungsprogramm im URL ONKALO, Finnland; VIRA 2008).

Einen breiten Raum nehmen In-situ-Untersuchungen bzw. Experimente zum besseren Verständnis der hydraulischen, geochemischen und physikalischen Transportphänomene von Radionukliden im Grundwasser sowie detaillierte Studien der Nahfeldprozesse und darauf basierende Sicherheits- und Risikoanalysen ein. Außerdem erfolgen Untersuchungen zum Einfluss tektonischer Prozesse, von Wärme und Strahlung auf die Eigenschaften der Wirtsgesteine und der technischen bzw. geotechnischen Barrieren sowie zum Zusammenwirken der verschiedenen Barrieren (z. B. Gasmigration, Retardation) und zur Erprobung der Einlagerungstechnik.

Zur Analyse der genannten Eigenschaften werden im Verlaufe der untertägigen Standorterkundungsarbeiten vor allem geologische Kartierungen der bergmännischen Auffahrungen und Bohrungen, bohrlochgeophysikalische, teilweise tomographische Messungen sowie hydrogeologische und gebirgsmechanische Untersuchungen durchgeführt (siehe z. B. ANDRA 2005a, SKB 2008). Parallel zur geologischen Kartierung erfolgen in vielen Fällen ein Laser Scanning und eine hoch aufgelöste photographische Dokumentation der untertägigen Aufschlüsse. Die Bohrkerne und Kernphotos werden zum Zwecke der Beweissicherung bis zum Abschluss des Genehmigungsverfahrens und des Endlagerbaus aufbewahrt. Die Ergebnisse der geologischen Kartierung werden in geologische 3D-Standortmodelle überführt, die entsprechend dem Erkundungsfortschritt fortlaufend ergänzt bzw. präzisiert werden (Abb. 82).

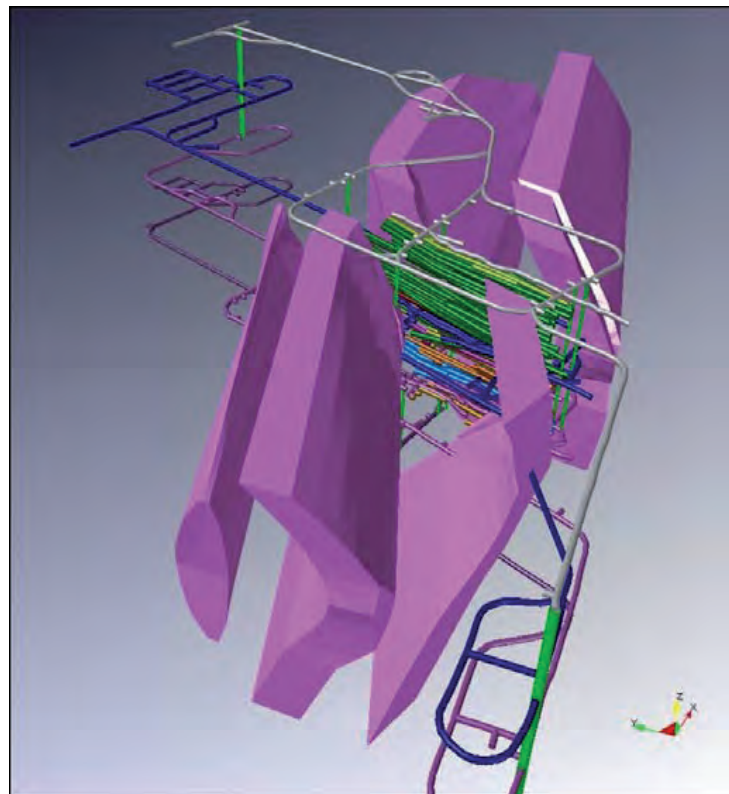


Abb. 82: Ausschnitt aus dem geologischen Modell und 3D-Bergwerksmodell für die in granitoiden Gesteinen befindliche Lagerstätte Antej bei Krasnokamensk, Sibirien. Die sich inzwischen über 12 Abbausohlen erstreckende Lagerstätte dient als generisches URL für die Untersuchung des Einflusses von sich mit der Tiefe ändernden Gebirgsspannungen auf den Endlagerbau in kristallinen Gesteinen. Deutlich zu sehen sind die in lila dargestellten erzkontrollierenden Störungszonen, die eine komplizierte Morphologie aufweisen und die Spannungsverteilung im Gebirge bzw. Bergwerk entscheidend beeinflussen.

Anders als in Salzformationen stehen für die geologische Kartierung in kristallinen Wirtsgesteinen keine stratigraphischen Leithorizonte zur Verfügung. Schwerpunkt der Kartierung ist daher die Aufnahme und Charakterisierung tektonischer Strukturen (Klüfte und Störungen) und petrographischer Gesteinsmerkmale. Darüber hinaus erfolgt eine felsmechanische Charakterisierung der Gesteine (RMR und Dokumentation der Stöße bezüglich Kluftabstände, -häufigkeit, Öffnungsweite, RQD-Index, etc.) sowie eine hydrogeologische Kartierung (Stoßfeuchtigkeit, Tropfstellen, wasserführende Klüfte), die auch eine hydrochemische Probenahme beinhaltet. Neben dem geologischen Standortmodell wird aus diesen Daten auch ein Kluftmodell unter Berücksichtigung geostatistischer Methoden erstellt (Abb. 83).

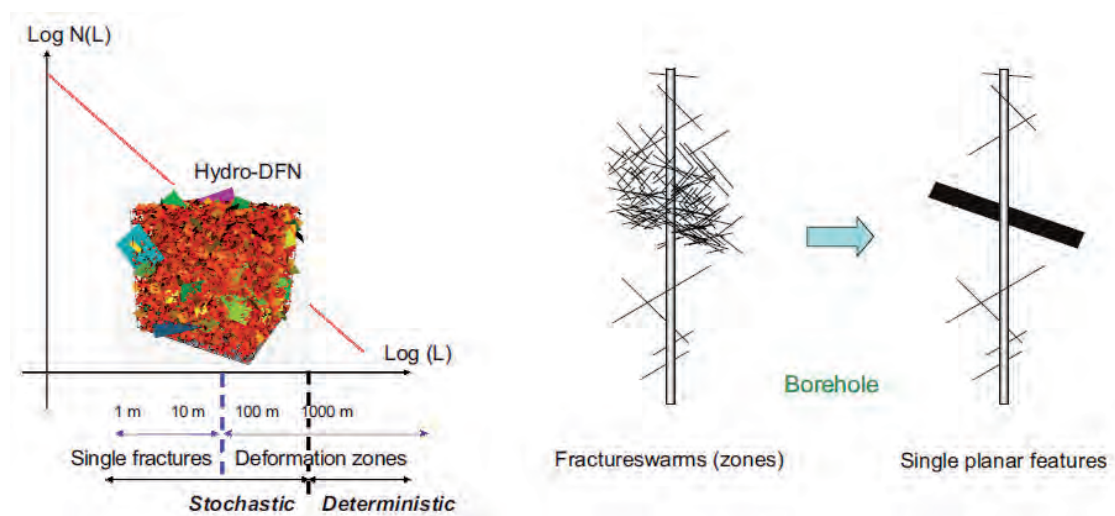


Abb. 83: Beispiel für ein Kluftmodell in kristallinen Gesteinen (DFN-Modell, SKB 2008)

Aufgrund des möglichen Einflusses von Alterationsprozessen auf die Barriereigenschaften der Gesteine (z. B. auf Radionuklid-Rückhaltevermögen und Standfestigkeit) müssen umfangreiche petrographische und geochemisch-mineralogische Untersuchungen der Gesteine, vor allem im Umfeld von Störungszonen, durchgeführt werden. Häufig werden in unterschiedlichen Teufenniveaus verschiedenartige metasomatische Umwandlungsprodukte mit z. T. stark variierenden elastischen bzw. Festigkeitseigenschaften festgestellt (Abb. 84). Diese Standortbesonderheiten müssen im Endlagerkonzept berücksichtigt werden.

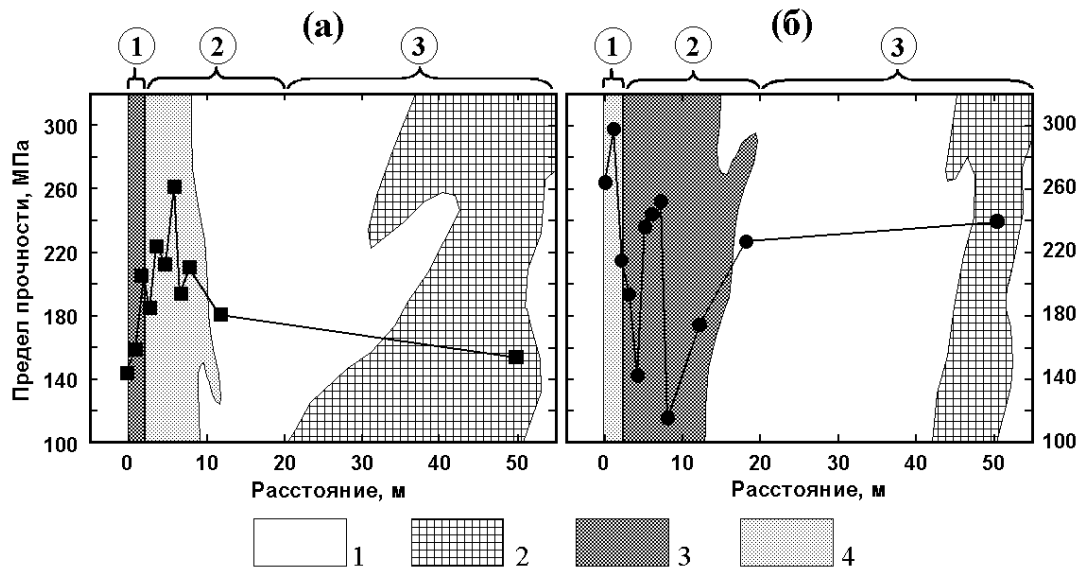


Abb. 84: Schematische Darstellung zum Vorkommen unterschiedlicher Metasomatoseprodukte im Umfeld von Störungszonen in verschiedenen Teufenniveaus (a – 9. Sohle, vorwiegend Verquarzung; б – 11. Sohle, Hydroglimmer-Argillit) und zu ihrem Einfluss auf die Festigkeitswerte (in MPa) granitoider Gesteine (analysiert für einen Bereich, der bis zu 50 m von dem Kern der Störungszone entfernt ist; Lagerstätte Anteј, bei Krasnokamensk, Sibirien, Russland; PETROV et al. 2008)

1 – gleichkörnige Granite, 2 – Kalifeldspatite und Albitite, 3 – Granite mit Hydroglimmern, 4 – verquarzte Granite; Architektur der Störungszone:

1 – Kernbereich der Störung, 2 – Zone des dynamischen Einflusses der Störung, 3 – Protolith (Wirtsgestein, unverändert)

Die Ergebnisse der im Rahmen zahlreicher Endlagerprojekte in kristallinen Gesteinen durchgeführten Modellierungen der Strömungs- und Transportprozesse zeigen zwar, dass es aus Gründen der Langzeitsicherheit des Endlagers nicht erforderlich ist, im Stadium der unterirdischen Detailerkundung jede Kluft bzw. Störungszone nachzuweisen (siehe z. B. WALLNER et al. 2005). Trotzdem ist es notwendig, hydraulisch aktive Zonen im Umfeld der geplanten Einlagerungsbereiche auszugliedern und ihre hydraulischen Eigenschaften zu bestimmen. Hierfür erfolgen interdisziplinäre Versuche, deren Daten auch Basis umfangreicher Modellberechnungen sind (z. B. im TRUE-Experiment, SKB 2008).

Ausgehend von den Ergebnissen der Langzeitsicherheitsanalyse ist für den potenziellen Endlagerstandort außerdem zu klären, ob Prozesse wahrscheinlich sind, die deutliche Veränderungen in der Orientierung der Gebirgsspannungsvektoren hervorrufen und zur Bildung hydraulischer Verbindungen zwischen Einlagerungsniveau und oberflächennahem Bereich (mit O₂-reichen Grundwässern) führen können. Als Belege für fehlende Wegsamkeiten zwischen oberflächennahen Grundwasserleitern und einzulagernden Abfallgebänden dienen ein hohes Alter der im Einlagerungsniveau angetroffenen Grundwässer, der fehlende Nachweis von Tritium und ¹⁴C in diesen Grundwässern sowie hydrochemische Indikatoren für das Nichtvorhandensein einer solchen Verbindung.

Bei der untertägigen Erkundung von Standorten in kristallinen Gesteinen beziehen sich die geophysikalischen Untersuchungen überwiegend auf die Erkundung und Charakterisierung von Kluftsystemen im Nah- und Fernfeld (Abb. 85). Hierfür werden Radarmessungen in Form von Reflexionsseismik in verschiedenen Maßstäben von mehreren hundert Metern bis zum Meterbereich eingesetzt. Die Messungen erfolgen entlang von Strecken und in Bohrungen, z. T. als Tomographie.

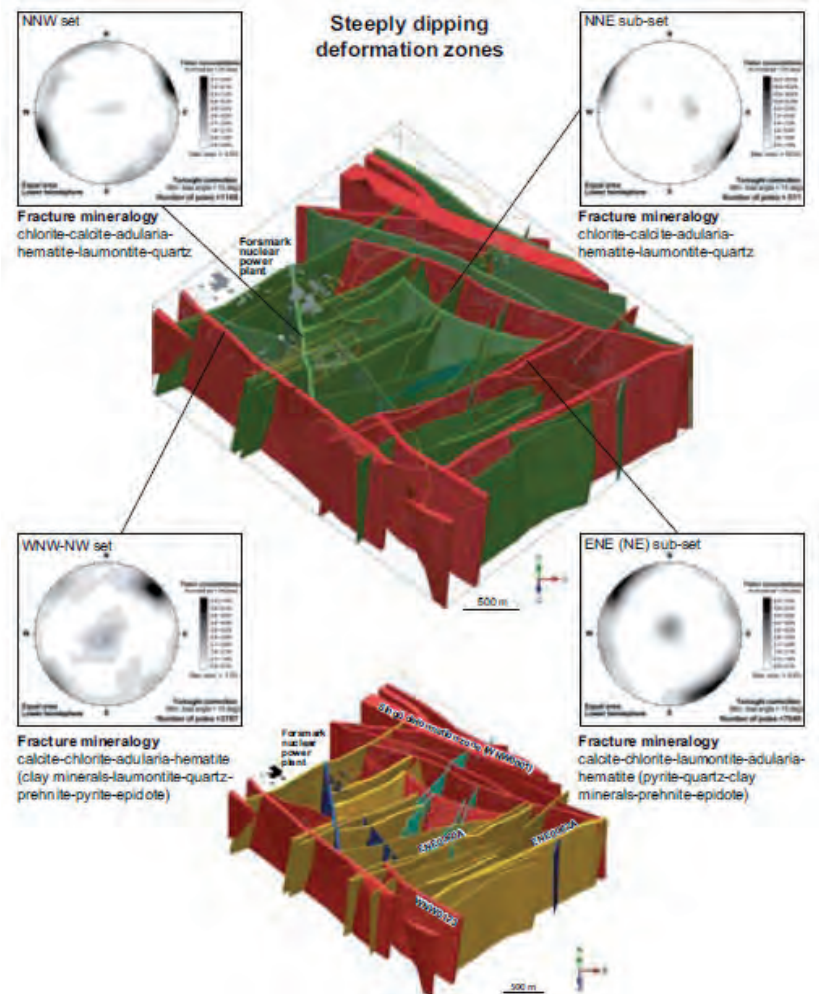


Abb. 85: 3D-Modell der mittels geophysikalischer Messungen am Standort Forsmark festgestellten Hauptdeformationszonen, unter Berücksichtigung der Trennflächenmineralogie (SKB 2008)

Zur Nahfelderkundung werden auch Ultraschallmessungen und geoelektrische Verfahren eingesetzt (Abb. 86). Geoelektrische Messungen kamen z. B. bei der Überwachung der Aufsättigung einer geotechnischen Tonbarriere im URL Äspö zum Einsatz (IPR-08-03). In einzelnen Experimenten werden bei Bedarf noch weitere geophysikalische Messmethoden eingesetzt. Information zur Lithologie liefern Gamma- (natural gamma-), Dichte- (gamma-gamma-) und susceptibility-Messungen. Zum Nachweis und zur Charakterisierung von

Klüften und Störungszonen werden häufig Widerstandsmessungen und Sonic-Messungen eingesetzt. Weiterhin kommen Kaliber und Neutron- (porosity-) Logs zum Einsatz. Standard ist der Einsatz von Borehole Imaging Processing Systemen (BIP, Abb. 87) und Bohrlochkameras.

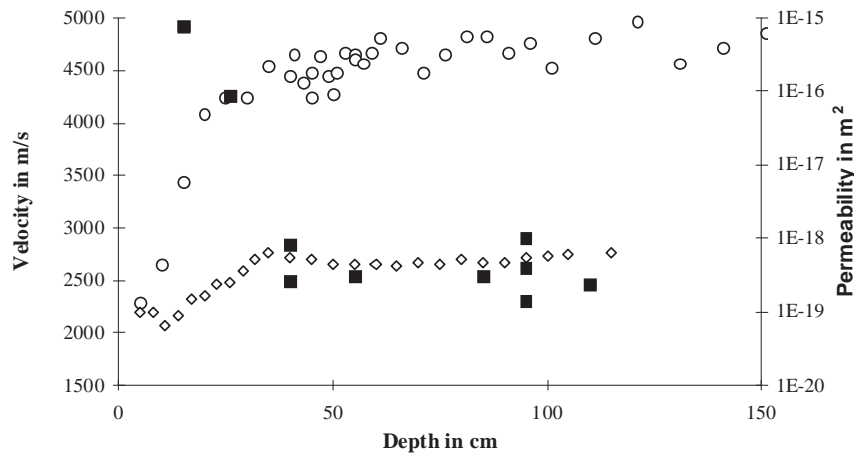


Abb. 86: Korrelation zwischen der hydraulischen Durchlässigkeit (schwarze Rechtecke) und den seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Kreise – Kompressionswellen, Rhomben – Scherwellen) im Bereich der EDZ im URL Äspö Bohrung 94001; Quelle: BGR)

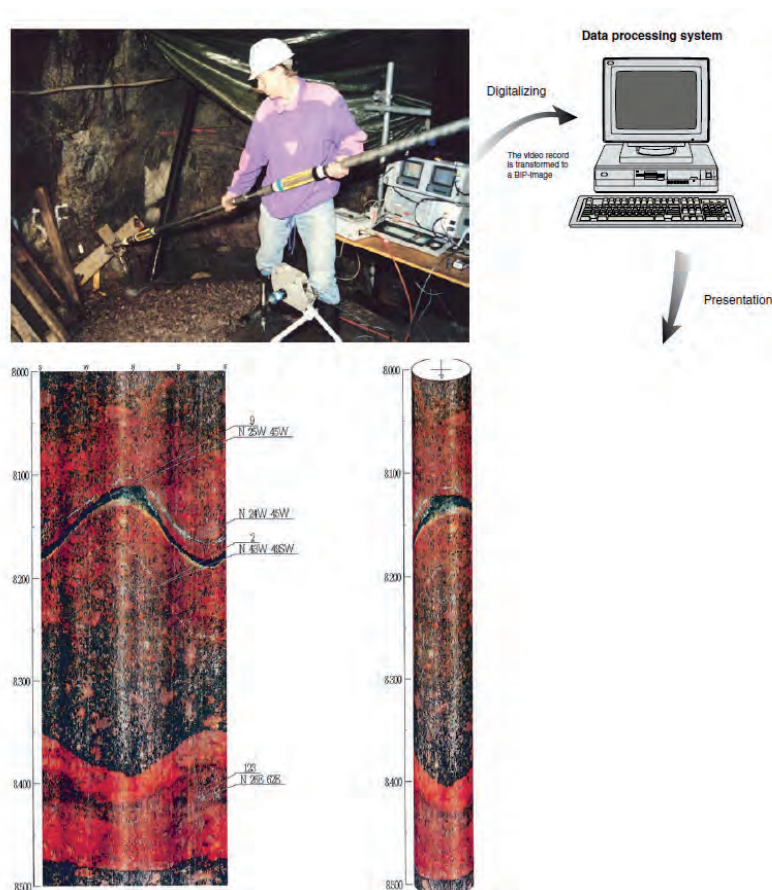


Abb. 87: Prinzip und Ergebnisse von BIP-Messungen am Standort Forsmark, Schweden (SKB 2005)

Einen breiten Raum nehmen bei der untertägigen Standorterkundung in kristallinen Gesteinen hydrogeologische Untersuchungen ein. Die In-Situ-Bestimmungen der Durchlässigkeiten bzw. Transmissivitäten erfolgen durch Druck-aufbaumessungen, Pumpversuche, Grundwasserdruckmonitoring, Interferenz- und Tracertests sowie Durchflussmessungen. Zur Charakterisierung von Kluftsystemen werden diese Tests häufig in Bohrlochfächern durchgeführt, die mehrere Kluftsysteme anschneiden und damit die Möglichkeit geben, die räumlichen Vernetzung der Klüfte zu untersuchen (z. B. Bohrlochkranzversuch, LIEDTKE et al. 1994 und Durchströmungsversuche, z. B. TRUE-Experiment, SKB 2008). Die Versuche werden mit unterschiedlichen Einfach- und Mehrfachpackersystemen durchgeführt.

Bei den hydraulischen Messungen stehen ausgehend von den Erfahrungen der Untersuchungen im URL Grimsel (NAGRA 2003) vor allem deutlich geschieferte, metamorph überprägte Gesteinsbereiche, intensiv geklüftete Wirtsgesteinspartien und Kontaktzonen von magmatischen Gängen oder Einschlüssen im Fokus. Außerdem werden zwecks Charakterisierung der hydraulischen und gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Auflockerungszone im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen (EDZ) umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen mit Kurzintervall- und Oberflächenpackern durchgeführt (Abb. 88, 89, 90 und 91).



Abb. 88: Kurzintervall-Packer zur Messung von Gesteinspermeabilitäten im Streckennahbereich (Quelle: BGR)



Abb. 89: Vorbereitung eines hydraulischen Tests zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone mittels Oberflächenpacker im URL Äspö (Quelle: BGR)

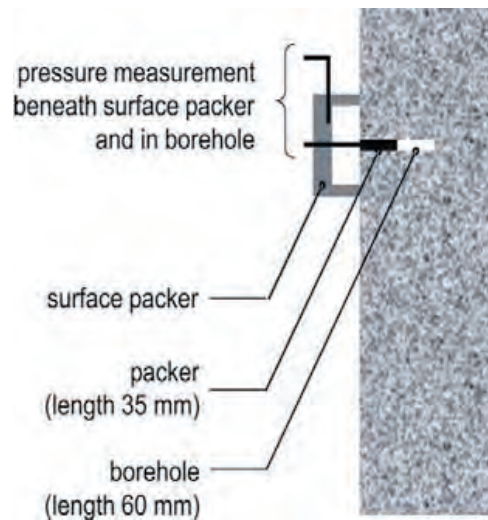


Abb. 90: Schematische Darstellung zur Nutzung von Oberflächenpackern bei der Analyse der hydraulischen Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen

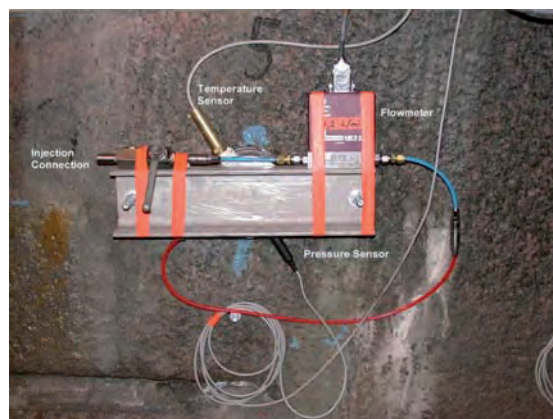


Abb. 91: Photo zum Einsatz eines Oberflächenpackers im URL Äspö (Quelle: BGR)

Die untertägigen hydrogeologischen Erkundungsarbeiten werden i.d.R. durch ein umfangreiches Hydro-Monitoring-System in den von über- und untertage gebohrten Bohrungen ergänzt. Dabei werden z. B. der Wasserdruck, der Grundwasserstand oder die elektrische Leitfähigkeit der Grundwässer erfasst. Im URL Äspö und in seinem unmittelbaren Umfeld befinden sich mehr als 140 Bohrungen (40 von der Oberfläche und ca. 100 vom Tunnel aus gebohrt), die regelmäßig vermessen werden.

In den letzten Jahren gewinnen hydrochemische und isotopehydrologische Untersuchungen zunehmend an Bedeutung, um die Kenntnisse zur Grund- und Porenwassergenese zu verbessern sowie insbesondere die Transporteigenschaften der Gesteine und der Trennflächensysteme auch in Verbindung mit geotechnischen Barrieren und Verschlussmaßnahmen zu untersuchen. Neben In-situ-Versuchen zu den Filtrationseigenschaften und Migrationsgeschwindigkeiten der Radionuklide mittels hydraulischer Testverfahren und Tracer-Versuchen (SMITH et al. 2001) sind Probenahme und Laborversuche ein wesentlicher Bestandteil dieser Versuche. Die dabei erzielten Ergebnisse dienen als Ausgangsgrößen für Grundwasserfließmodelle bzw. Filtrations-Transport-Modellierungen, allerdings machen Dispersionseffekte und eine meist nur geringe Versuchsdauer quantitative Aussagen kompliziert (FRICK & ALEXANDER 1992, MCKINLEY & ALEXANDER 1992).

Eine detaillierte untertägige Erkundung von Endlagerstandorten im Kristallin umfasst umfangreiche Analysen des Spannungs- und Deformationszustandes der Gesteine. Erfahrungen der Erkundung des potenziellen finnischen Endlagerstandortes Olkiluoto (POSIVA 2005) und des URL Grimsel (PAHL et al. 1989) belegen das häufige Vorkommen von deutlichen geomechanischen Anisotropien in kristallinen Gesteinen, gepaart mit stark mit der Tiefe oder der Nähe zu mächtigen Störungszonen variierenden Gebirgsspannungsbeträgen. Der Spannungszustand kristalliner Gesteine wird unter In-situ-Bedingungen mittels Hydrofracturing, Überbohrversuchen oder Packerabdrücktests bestimmt (Abb. 92). Zusätzlich können unter Laborbedingungen mittels Kornrelaxation bzw. Rekompaktion von Spannungsrissen (RACOS-Verfahren, BRAUN et al. 1999) die Spannungsverteilungen im Gestein analysiert werden.

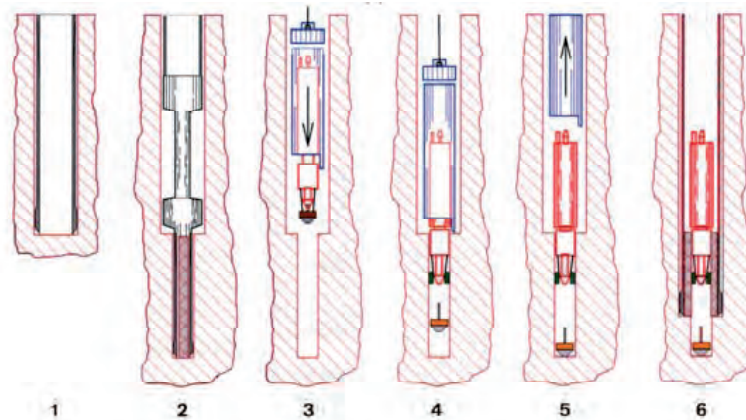


Abb. 92: Schematische Darstellung zum Prinzip von Gebirgsspannungsmessungen mittels Überbohrmethode (SKB 2005)

Parallel dazu erfolgen In-situ-Messungen des untertägigen Deformations- bzw. Ausbruchverhaltens der Gesteine mittels Konvergenz-, Extensometer- und Fissurometer-Messeinrichtungen. Die dabei zum Einsatz kommenden Verfahren und Geräte unterscheiden sich prinzipiell nicht von den Arbeiten im Steinsalz oder Tongestein (siehe Kap. 3.2.2.1 und Kap. 3.2.2.3). Zur Erfassung und Lokalisierung von Spannungskonzentrationen und der daran gebundenen bruchhaften Ereignisse werden ähnlich wie in den anderen Wirtsgesteinstypen mikroakustische Messungen in speziell angeordneten Bohrungen durchgeführt. Ergänzend werden felsmechanische Laborversuche zur Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie gesteinsphysikalischer Parameter realisiert.

Da die Temperaturen im geplanten Einlagerungsniveau wesentlichen Einfluss auf das Endlagerkonzept bzw. den Endlagerbau inklusive die Ausmaße des Endlagers haben, müssen sie im Vorfeld der endgültigen Standortentscheidung exakt untersucht werden. Die thermophysikalischen Gesteinsparameter, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins, bestimmen entscheidend die Geschwindigkeit der Wärmeabfuhr in das Gebirge und damit die Höhe der Maximaltemperaturen in Behälternähe. Bei den Untersuchungen ist zu beachten, dass in anisotropen, z. B. geschichteten Gesteinen die thermische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Petrographie der Gesteine und der Teufe sowie von der Gesteinsanisotropie bzw. von der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Gesteinstypen richtungsabhängig beträchtlich schwanken kann (SKB 2008).

Im Ergebnis der untertägigen Standorterkundung müssen detaillierte Kenntnisse zur räumlichen Verteilung von Gesteinen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften vorliegen. Grundsätzlich sind demnach solche Lithotypen für die Einlagerung zu wählen, die eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass lithologische Einheiten mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit

nicht in unmittelbarer Nähe des Endlagers anzutreffen sind, da diese als Wärmestauer agieren. Dies stellt erhöhte Anforderungen an den Nachweis derartiger Gesteine im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches durch Erkundungsbohrungen bzw. mittels geophysikalischer Verfahren.

3.2.2.6 Beispiele für die untertägige Standorterkundung in kristallinen Gesteinen

Als Beispiele für komplexe und detaillierte untertägige Standorterkundungen in kristallinen Gesteinen können die Untersuchungen im Felslabor Grimsel (Schweiz), im Felslabor Stripa (Schweden), im URL Whiteshell (Kanada) und in den standortbezogenen URL's Äspö (Schweden) und ONKALO (Finnland) dienen. Die untertägigen Standorterkundungsarbeiten konzentrieren sich auf struktur- und hydrogeologische sowie gesteinsphysikalische Untersuchungen. Im Ergebnis dieser Untersuchungen müssen die Vorkommen von intensiv geklüfteten Gesteinsbereichen bzw. von Störungszonen sowie von magmatischen Gängen und mächtigen Einschlüssen lokalisiert und die hydraulischen Eigenschaften dieser Gesteine bzw. ihrer Kontaktzonen bekannt sein. Außerdem müssen Daten zur lithologischen Zusammensetzung der Gesteine, zur Intensität ihrer Deformation bzw. Überprägung und zu ihren endlagerrelevanten Eigenschaften sowie zur räumlichen Verteilung von Gesteinen mit deutlich unterschiedlichen Materialparametern vorliegen.

Die Angaben zur Verteilung von Gesteinen mit signifikant verschiedenen endlagerrelevanten Eigenschaften haben entscheidenden Einfluss auf die Planung des Endlagers und die sichere Dimensionierung der geotechnischen Barrieren. Gerade Störungszonen und Kontaktbereiche bzw. stofflich-texturelle Inhomogenitäten stellen beim Auffahren des Endlagerbergwerkes sowie bei bergbaubedingten oder geogenen Deformationsprozessen Schwächezonen dar. Außerdem erschweren ungenaue diesbezügliche Angaben Vorhersagen möglicher Veränderungen der physikomechanischen und wärmephysikalischen Eigenschaften der Gesteine in Raum und Zeit. Sie müssen deshalb im Ergebnis der untertägigen Standorterkundung möglichst exakt ausgewiesen und bei der Modellierung des Langzeitverhaltens der geologischen Barriere berücksichtigt werden.

Die in den genannten URL vorgenommenen Untersuchungen konzentrieren sich auf folgende Themen:

- Analysen der Zusammensetzung und der In-situ-Eigenschaften der Wirtsgesteine,
- Experimente zur Überprüfung der Barrierefunktionen der Wirtsgesteine unter In-situ-Bedingungen (z. B. in-situ Migration Tracer Test),

- Untersuchungen zur Modellentwicklung bzw. -verifizierung für die im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen durchzuführenden Transport- bzw. Retardationsberechnungen,
- Demonstrationsversuche, z. B. zur Stabilität der Kupfercontainer, des Bentonitbuffers und des Backfill- und Abdicht- bzw. Plugging-Materials,
- In-situ-Versuche zur praktischen Erprobung verschiedener technischer bzw. geotechnischer Endlagerkomponenten sowie
- Arbeiten zur Weiterentwicklung der Untersuchungsmethoden, des Endlagerkonzeptes und der Einlagerungstechnik.

Die Durchführung dieser Arbeiten ist sehr zeitaufwändig und kostenintensiv. So z. B. wurde das kanadische URL Whiteshell ab 1984 errichtet. Die In-situ-Untersuchungen laufen seit 1989 und werden voraussichtlich erst 2011 abgeschlossen sein. Das nahe des KKW Oskarshamn gelegene URL Äspö wurde nach 4 Jahren übertägiger Erkundungstätigkeit ab 1990 errichtet. Die In-situ-Experimente dauern bis heute an (siehe HAMMER et al. 2009). Viele der Versuche werden aufgrund der hohen Kosten und der Ähnlichkeit der verwendeten nationalen Endlagerkonzepte in internationaler Zusammenarbeit durchgeführt.

Die bei der Analyse der Zusammensetzung und der endlagerrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteine zum Einsatz kommenden Untersuchungsmethoden sind bereits in Kap. 3.2.2.5 beschrieben worden. Zur Erkundung der räumlichen Orientierung und Vernetzung der Trennflächensysteme und zur Analyse ihrer hydraulischen Eigenschaften werden Erkundungsbohrungen und geologische Kartierungsarbeiten durchgeführt. Die möglichst detaillierte Erfassung von potenziellen Grundwassermigrationsbahnen und ihre umfassende hydraulische Charakterisierung durch In-situ-Untersuchungen (z. B. Pumpversuche, Abb. 93) sind wichtige Voraussetzungen für eine Bewertung der hydrogeologischen Eignung des Standortes. Kernbohrungen liefern darüber hinaus Daten zur Ausbildung bzw. Variationsbreite und zu den Eigenschaften der Gesteine sowie über die mineralogisch-petrographischen Veränderungen der Gesteine im Umfeld der vorkommenden Trennflächen.

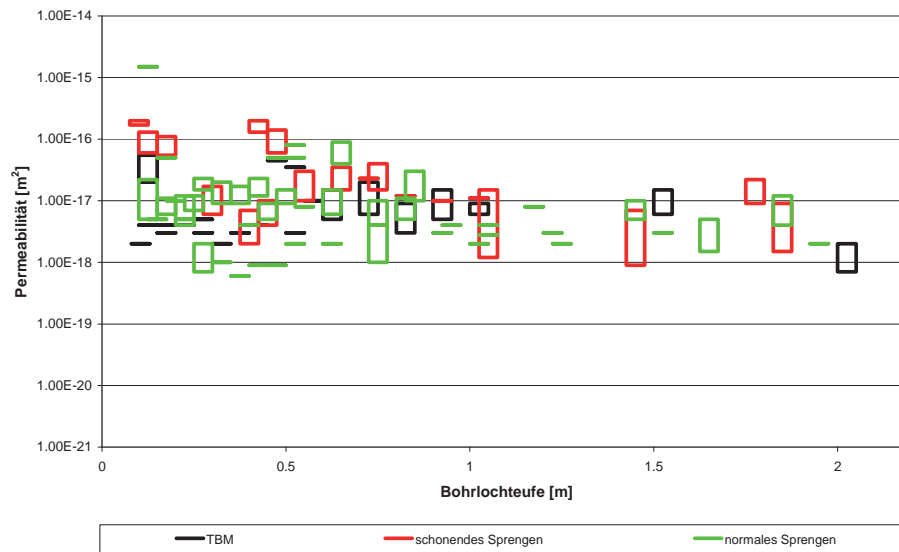


Abb. 93: Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im Umfeld einer bergmännischen Auffahrung (URL Äspö; Quelle: BGR)

Neben umfangreichen hydrogeologischen Untersuchungen nehmen bei der untertägigen Erkundung im Kristallin Analysen der Gebirgsspannungen und des Deformationszustandes der Gesteine einen breiten Raum ein. Die dazu verwendeten Methoden entsprechen den in Kap. 3.2.1.3 und Kap. 3.2.2.5 beschriebenen Verfahren. Speziell dafür gestoßene Bohrungen oder ein Teil der Erkundungsbohrungen verfügen über eine geophysikalische Instrumentierung, die zur Charakterisierung der Stressbeanspruchung der Gesteine dient. Die mittels dieser Messungen bestimmten Hauptspannungen und -richtungen bilden gemeinsam mit den Angaben zu den Vorkommen wasserführender Störungs- bzw. Klüftzonen die Grundlagen für die Planung des Endlagerbaus, z. B. für die Festlegung der Ausrichtung der Endlagerstrecken.

Aufgrund der Wichtigkeit von gesicherten Kenntnissen zur Verteilung der Gebirgsspannungen im Gebirge und zum Deformationsregime der Gesteine werden i.d.R. sehr komplexe, umfangreiche Experimente zur Analyse der aktuellen Spannungsverteilungen und der räumlichen Anordnung von bruchhaften Deformationsereignissen sowie Modellrechnungen zur wahrscheinlichen perspektivischen Entwicklung der Gebirgsspannungen (unter Zugrundelegung der Auswirkungen aus dem Endlagerbau und -betrieb) durchgeführt. Ein Beispiel für derartig komplexe Untersuchungen im kanadischen URL Whiteshell ist in Abb. 94 dargestellt.

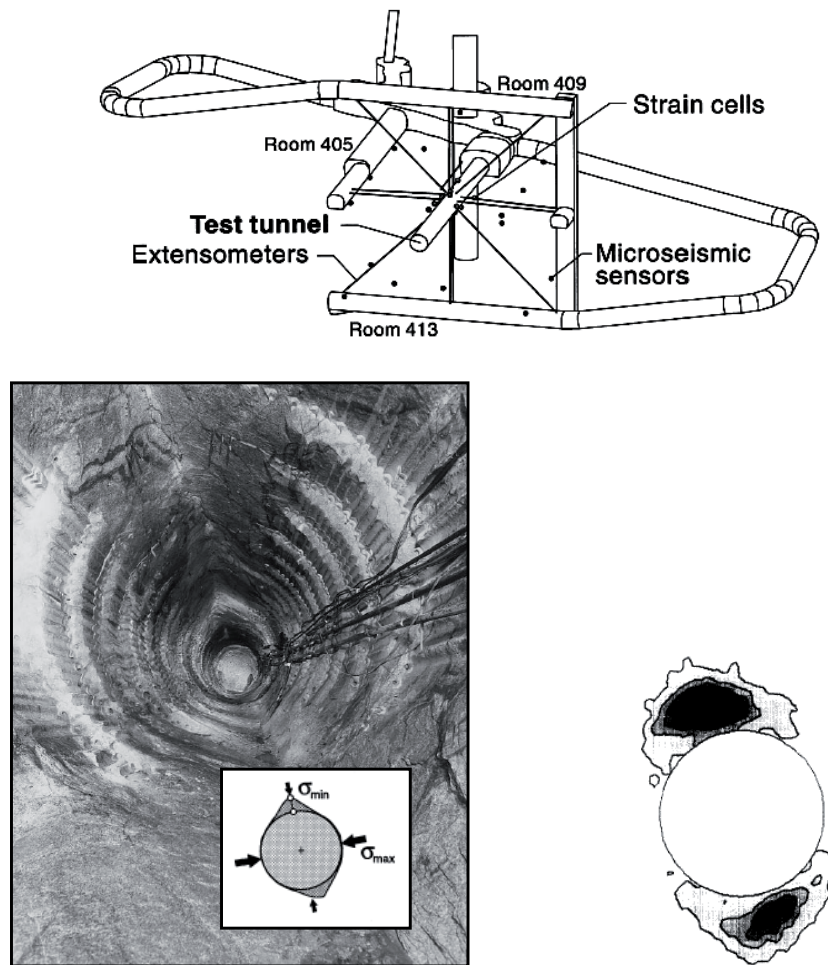


Abb. 94: Schematische Darstellung der Infrastruktur für das Mine-by-Experiment auf der 420 m-Sohle des URL Whiteshell im Granitmassiv Lac du Bonne, Kanada (nach READ et al. 1998). Die Untersuchungen dienen zur Feststellung des Einflusses schwieriger tektonischer Rahmenbedingungen ($s_1=60\pm 3$ MPa, $s_2=45\pm 4$ MPa, $s_3=11\pm 2$ MPa) auf die Stabilität bergmännischer Auffahrungen, insbesondere von vertikal verlaufenden Auffahrungen (mit einem Durchmesser von 3,5 m, siehe Photo). Deutlich zu sehen ist die Ellipsenform, wobei die Deformationen bevorzugt in der Achse des minimalen Stresses angeordnet sind. Die In-situ-Messdaten werden durch die Ergebnisse der Messungen mikroakustischer Emissionen (es wurden ca. 9000 Ereignisse erfasst) bestätigt (rechte untere Abbildung).

Aus In-situ-Untersuchungen sowie aus Modellierungen der Radionuklidtransportprozesse wird deutlich, dass es in geklüfteten, gestörten Kristallinkomplexen durch eine Vernetzung von Wasserwegsamkeiten schnell zu einem Austrag der Radionuklide in die Biosphäre mit entsprechend hohen Expositionsraten kommen kann. In Langzeitsicherheitsbetrachtungen haben demzufolge die technischen und geotechnischen Endlagerbarrieren sowie detaillierte struktur- und hydrogeologische Standortdaten eine besondere Bedeutung. Deshalb erfolgen zusätzlich zu den In-situ-Untersuchungen zur Analyse der Einflussgrößen auf die endlagerrelevanten Gesteinseigenschaften umfangreiche Studien zur Optimierung des Endlagerkonzeptes und zur Bewertung des Einflusses der Wärme produzierenden Abfälle

und des Endlagerbaus auf die Barriereigenschaften der Wirtsgesteine und technischen/geotechnischen Barrieren. So wurden z. B. im URL ONKALO folgende Arbeiten und Versuche durchgeführt (VIENO et al. 1992):

- Auslaugungsverhalten der Brennelemente unter In-situ-Bedingungen,
- Korrosion der Kanister und Austritt von Wasserstoff durch den Bentonitbuffer,
- Studium der Auflockerungszone hinsichtlich Ausmaß, Intensität der Deformation sowie Entstehung und Verheilung von Klüften,
- Radionuklidlöslichkeit und -migration im Nahfeld-Milieu sowie
- Bedeutung von Kolloidtransport und Matrixdiffusion für den Radionuklidtransport.

Besonders umfangreiche Untersuchungen zur Bewertung der Rückhalteeigenschaften kristalliner Wirtsgesteine und zur Optimierung der Endlagerkonzepte in Magmatiten erfolgten in enger internationaler Kooperation im URL Äspö (Abb. 95). Die wichtigsten Arbeiten zur Charakterisierung der natürlichen und geotechnischen Barrieren sind nachfolgend aufgeführt :

a) natürliche Barriere

- Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE und TRUE-1),
- Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE),
- Colloid Dipole Project (bis Anfang 2008) und Colloid Project,
- Microbe Project,
- Matrix Fluid Chemistry Experiment,
- Radionuclide Retention Project (Spent Fuel Leaching, Transport Resistance at the Buffer-Rock Interface; RNR-Experiment),
- Palaeohydrogeological Data Analysis and Model Testing (Padamot),
- Fe-oxides in Fractures,
- Two-Phase Flow,
- Swiw-Tests with Synthetic Groundwater,
- Cleaning and Sealing of Investigation Boreholes,
- Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes.

b) geotechnische Barrieren

- Prototype Repository,
- Alternative Buffer Materials,
- Long Term Test of Buffer Materials (Lot),
- Horizontal Deposition,
- Backfill and Plug Test, Canister Retrieval Test,
- Temperature Buffer Test (TBT),
- KBS-3 Method with Horizontal Emplacement,
- Sealing of Tunnel at Great Depth,
- Large Scale Gas Injection Test (LASGIT),
- Äspö Pillar Stability Experiment,
- In situ Corrosion Testing of Miniature Canisters,
- Rock Shear Experiment (Rex Project),
- Task Force on Engineered Barrier Systems.

Die Ergebnisse der experimentellen und Standortuntersuchungen werden in speziellen Datenbanken zusammengetragen, wie z. B. in „SKB's site characterization database (Sicada)“.

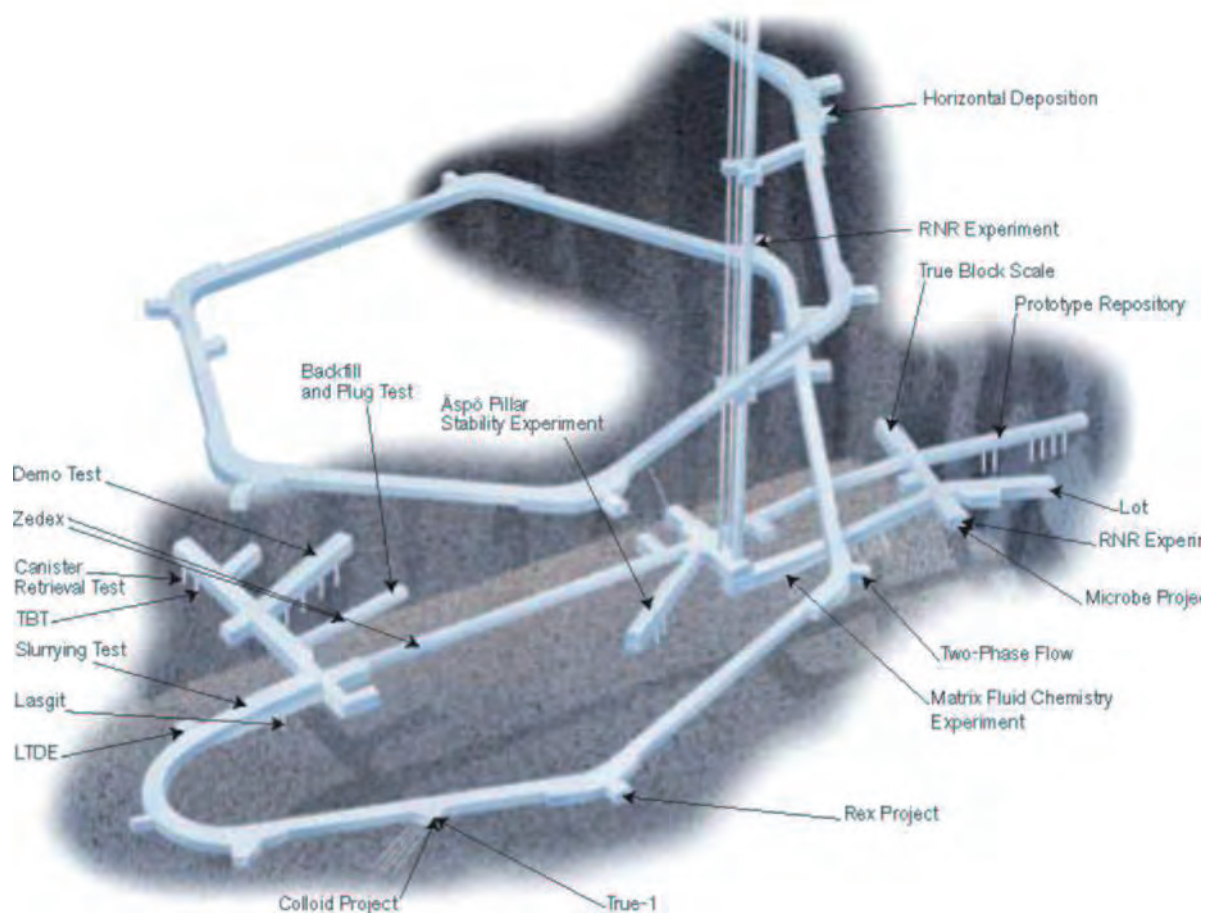


Abb. 95: Übersicht zu den In-situ-Experimenten und zur Lage der Versuchsorte im URL Äspö (Quelle: BGR)

4 Zusammenfassung

Auf der Basis der Ergebnisse von Langzeitsicherheitsstudien und der Untersuchung von natürlichen Analoga (z. B. Uranlagerstätten) werden für die Endlagerung von hochradioaktiven, Wärme entwickelnden Abfällen weltweit aufgrund des erforderlichen langfristigen Isolationspotenzials tief lagernde geologische Formationen vorgesehen. Die Endlagerkonzepte richten sich neben technischen Anforderungen, die sich aus der Art der Abfälle und ihrer Menge ergeben, vor allem nach den spezifischen Eigenschaften der für den Endlagerbau vorgesehenen Wirtsgesteine. Aufgrund ihrer Barriereigenschaften werden Steinsalz, Tongesteine und Kristallin als mögliche Wirtsgesteine für HAW-Endlager angesehen.

Die Auswahl des Wirtsgesteins richtet sich in erster Linie nach den national vorhandenen geologischen Formationen. So z. B. werden Schweden und Finnland ihre radioaktiven Abfälle aufgrund des Fehlens anderer Wirtsgesteinsoptionen in kristallinen (granitoiden) Gesteinen in der Nähe zu den Kernkraftwerken lagern. Die Auswahl eines geeigneten

Standortes für ein HAW-Endlager basiert auf geowissenschaftlichen Auswahlkriterien und Langzeitsicherheitsüberlegungen sowie auf raumordnerischen und sozioökonomischen Standortanforderungen, wobei die geowissenschaftlichen Kriterien prioritär sind.

Es existiert kein international vereinbarter Standard für die Vorgehensweise bei der Standortauswahl/-festlegung sowie die bei der Standorterkundung und -bewertung einzusetzenden Untersuchungsmethoden. Die Auswahl von prinzipiell geeigneten Standorten für die Endlagerung der HAW-Abfälle ist durch eine, auf zunehmend umfangreichere Datengrundlage basierende, permanente Evaluation und Aussortierung von Standortalternativen gekennzeichnet. Aufgrund spezifischer geologischer Gegebenheiten (z. B. Vorkommen unterschiedlicher potenziell geeigneter Gesteinstypen, Fehlen von Wirtsgesteinsalternativen, Ausschluss von Landesteilen infolge seismischer oder vulkanischer Gefährdungen), unterschiedlich gewichteter Standortauswahlkriterien sowie verschiedenartiger rechtlicher, verwaltungstechnischer und politischer Vorgaben für den Auswahlprozess, variieren Anzahl, Inhalt und Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte. Deutliche länderspezifische Unterschiede gibt es auch hinsichtlich der Prozedur beim Vergleich und bei der Reihung mehrerer vorausgewählter bzw. prinzipiell geeigneter Standorte.

Trotz aller länderspezifischen Unterschiede kann der Standortauswahlprozess in die Etappen Screening („overview studies“, „feasibility studies“, „area survey stage“, regionale Vergleichsstudien), Standortvorauswahl (d. h. Ausweisung von untersuchungswürdigen Standortregionen), übertägige detaillierte Standorterkundung, untertägige Standorterkundung sowie endgültige Standortentscheidung untergliedert werden. In den meisten Ländern sind bei Erkundungsbefunden, die die Langzeitsicherheit des Endlagers entscheidend in Frage stellen, Rücksprünge in vorherige Auswahlstadien vorgesehen.

Die unterschiedlichen physikalischen und mineralogisch-geochemischen Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen erfordern eine gesteinspezifische Vorgehensweise bei der Auswahl und Erkundung der Endlagerstandorte. So z. B. hängt die im Ergebnis der geologischen Erkundung nachzuweisende Mindesteinlagerungsfläche entscheidend von der Temperatur- bzw. Wärmeleitfähigkeit der Gesteine ab. Die Größe der Fläche und die an sie gestellten Anforderungen bestimmen wiederum die bei der Erkundung einzusetzenden geologisch-geophysikalischen Untersuchungsverfahren. Die unterschiedlichen mineralogisch-geochemischen und petrophysikalischen Barriereigenschaften der Gesteine erfordern eine Anpassung der Endlagerkonzepte an die Standortrandbedingungen und Wirtsgesteinsbesonderheiten.

Ausgehend von den in Teil 1 der Abschlussdokumentation zum EUGENIA-Projekt (HAMMER et al. 2009) herausgearbeiteten wirtsgesteinspezifischen Auswahlkriterien ergeben sich Unterschiede in den Erkundungszielen und in den Methoden, die bei der Suche und Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Steinsalz, Tongestein und Kristallin eingesetzt

werden. Für diese Typen von Wirtsgesteinsformationen wurden in Tabelle 1 bis 3 die wichtigsten Anforderungen an HAW-Endlagerstandorte zusammengestellt. Die konkreten Ziele der geologischen Erkundungsarbeiten und die eingesetzten Untersuchungsverfahren werden maßgeblich durch die Eigenschaften der vorgesehenen Wirtsgesteine und vom darauf basierenden Endlagerkonzept bestimmt. Das Untersuchungskonzept zur Standorterkundung ist außerdem abhängig vom bereits vorhandenen Kenntnisstand zum geologischen Aufbau des potenziellen Endlagerstandortes.

Im Regelfall beschränken sich in frühen Stadien der Standortsuche bzw. bei der Standortvorauswahl, d. h. beim Vergleich von Untersuchungsregionen, die Arbeiten auf die Sammlung und Analyse der bereits aus anderen Untersuchungsprogrammen (z. B. Rohstoffsuche und geologische Kartierung) vorhandenen geologischen, raumordnerischen, planungswissenschaftlichen u. a. Daten. In den frühen Phasen der Standortauswahl dominieren vor allem Studien zur räumlichen Verbreitung, Mächtigkeit und Tiefenlage, Zusammensetzung und zu den Eigenschaften der potenziellen Endlagerwirtsgesteine. Weiterhin werden Untersuchungen zu den seismischen Aktivitäten in den Standortregionen und zur geodynamischen Entwicklung der in Frage kommenden Gebiete durchgeführt. Parallel dazu erfolgen Analysen der regionalen Spannungsfelder und Untersuchungen zur Ausweisung von Lineamenten bzw. mächtigen Störungszonen, zur GPS- bzw. Satelliten-gestützten Erfassung von Vertikal- und Horizontalverschiebungen einzelner geologischer Blöcke sowie kleinmaßstabige aerogeophysikalische oder an der Erdoberfläche durchgeführte geophysikalische Messungen zwecks Abgrenzung von Störungszonen und zur Entwicklung erster Vorstellungen zum geologischen Tiefenbau, zu den Deckgebirgsmächtigkeiten und zur Verteilung unterschiedlicher Gesteinstypen. Spezielle geomorphologische und quartärgeologische Untersuchungen dienen zur Rekonstruktion und Prognose der Erosionsgeschwindigkeiten und des Einflusses von Inlandvereisungen auf die Langzeitsicherheit des Endlagers sowie der langfristigen Hebungs- und Absenkungsprozesse in den näher betrachteten Regionen.

Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Datenherkunft und der Datenqualität/-quantität ist es häufig notwendig, die bereits vorhandenen Datensätze hinsichtlich der zu klärenden Fragestellungen aufzuarbeiten, zu homogenisieren und ggf. zu ergänzen, um vergleichbare Informationen für die anstehenden Eignungsbewertungen zu haben. Für die Beschaffung der in dieser Phase des Auswahlprozesses notwendigen Daten, z. B. zu den tektonischen und hydrogeologischen Bedingungen in den Regionen, werden sämtliche in Archiven, speziellen Datenbanken (z. B. Bohrungsdatenbanken der Geologischen Dienste oder in Datenbanken zusammengestellte Ergebnisse seismischer Profilmessungen), Publikationen, internen (nicht publizierten) Firmenberichten oder Web-Portalen vorhandenen Informationen gesichtet. Wenn erforderlich, werden diese Daten gezielt neu ausgewertet oder reprozessiert. Liegen die notwendigen Kenntnisse für die Anwendung der Kriterien noch nicht vor, so müssen sie z. B. durch die Auswertung

geologischer oder topographischer Karten bzw. Berichte neu generiert oder ggf. durch ergänzende geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten gewonnen werden.

Zur weiteren Untersuchung der im Ergebnis der Standortvorauswahl als prinzipiell geeignet eingestuften Endlagerstandorte erfolgt anschließend eine detaillierte übertägige geologisch-geophysikalische Erkundung. Diese Arbeiten dienen vor allem zur Ermittlung von standortbezogenen Basisdaten, auf deren Grundlage die Erfüllung der Standortanforderungen (insbesondere Ausdehnung, Lage, Mächtigkeit u. Tiefe des Wirtsgesteins) nachgewiesen wird und die Durchführung einer standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse erfolgt. Hierzu gehören auch Untersuchungen der über- und unterlagernden Schichten und des Nebengebirges sowie von im Untersuchungsgebiet vorkommenden Kluft- und Störungszonen. Außerdem liefert die übertägige geologische Erkundung einen Großteil der standortbezogenen Daten, die zur Entwicklung bzw. Optimierung des Endlagerkonzeptes sowie für die Planung und Durchführung des Endlagerbaus notwendig sind, inklusive Klärung der bautechnischen Machbarkeit.

Die wesentlichsten Methoden zur übertägigen Standorterkundung sind geologische und geomorphologische Kartierungen, Präzisionsmessungen des Oberflächenreliefs oder spezielle Auswertung von geologischen Kartenwerken zwecks Identifizierung von Störungszonen und lithologischen Grenzen. Parallel dazu erfolgen Auswertungen von Luftbildaufnahmen bzw. Fernerkundungsdaten zur Ausweisung von mächtigen, möglicherweise neotektonisch aktiven Störungszonen, aerogeophysikalische Messungen zur Bestimmung der Lagerungsverhältnisse und der Mächtigkeit sedimentärer Deckgebirgsschichten oder zum Nachweis von intensiv geklüfteten Gesteinsbereichen. Ergänzend kommen geodätische Präzisionsnivellements und/oder Satelliten- bzw. Flugzeug-gestützte Messungen zur Bestimmung der Hebungs- und Senkungsraten der näher untersuchten geologischen Einheiten zum Einsatz. Weiterhin breit angewendet werden von Übertage ausgeführte Erkundungsbohrungen und geophysikalische Untersuchungen an der Erdoberfläche bzw. in den Bohrungen zur Analyse des geologischen Baus des Fernfeldes und des Wirtsgesteins, ergänzt durch hydrogeologische Messungen in den Erkundungsbohrungen sowie felsmechanische und thermophysikalische Untersuchungen an den Bohrkernproben. Die Tiefbohrungen werden dabei möglichst nicht in potenzielle Einlagerungsbereiche niedergebracht, um die Barriereintegrität nicht zu beeinträchtigen. Weiterhin erfolgen Bestimmungen der In-situ-Stressbedingungen mittels Überbohrversuchen, geochemische Untersuchungen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und des Deck- bzw. Nebengebirges sowie der Grundwässer zur Bestimmung der Grundwassermigration, -dynamik und -verweilzeiten oder zum Nachweis von Mixingprozessen.

Umfang und Inhalt der Untersuchungsprogramme hängen vom bereits vorliegenden Kenntnisstand sowie von der für die Eignungsbewertung und den Langzeitsicherheitsnachweis benötigten Informationsdichte und -qualität ab. Die Anzahl der übertägig erkundeten Standorte schwankt länderspezifisch (siehe HAMMER et al. 2009). Im Ergebnis der übertägigen Erkundungsarbeiten werden die Standortalternativen entsprechend ihrer Eignung gereiht.

Die oberflächlich eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Wirtsgesteinstyp. Während bei Standorterkundungen im Steinsalz vorwiegend seismische Untersuchungsverfahren zur Abgrenzung der Struktur und zur Analyse des Deck- und Nebengebirges eingesetzt werden, finden im Kristallin und Tonstein neben seismischen Messungen auch geoelektrische und elektromagnetische Methoden zum Nachweis von hydraulisch aktiven Störungszonen und zur Bestimmung der lithologischen Zusammensetzung der Wirtsgesteine und der Deck- bzw. Nebengebirgsschichten Anwendung.

Ausgehend von den Auswahlkriterien (siehe HAMMER et al. 2009) und den Daten, die für den Eignungs- bzw. Langzeitsicherheitsnachweis für einen HAW-Endlagerstandort in Salzformationen erforderlich sind, ist die übertägige Erkundung von Salzformationen vor allem auf die Analyse der äußeren Form der Salzstruktur sowie der räumlichen Verbreitung und Tiefenlage der Salzgesteine, inklusive Tiefenposition und strukturelogischer Bau des Sockels (Zerblockungsgrad, mächtige überregionale sowie lokale Störungszonen im Liegenden der Salzstruktur) ausgerichtet. Außerdem muss die übertägige Standorterkundung erste Informationen zum Internbau der Salzstruktur (wie z. B. Baustil, Heterogenität, Mächtigkeit und Verteilung der Steinsalzsichten, Ausbildung und Häufigkeit von Kalisalzen und Anhydritlagen), zur lithologischen Zusammensetzung und Mächtigkeiten der Schichten im Nebengebirge bzw. in den Randsenken und daraus ableitbare Schlussfolgerungen zur Entwicklung des Salzstocks (z. B. Aufstiegsgeschwindigkeiten und Entwicklungsstadium eines Salzstocks) liefern. Erforderlich sind auch Daten zur Intensität der natürlichen Ablaugung, zur Mächtigkeit und zum Aufbau des Hutgesteins und zum struktur- und hydrogeologischen Aufbau des Deckgebirges (inklusive spezielle hydrogeologische Untersuchungen in den Schichten des Deckgebirges). Ergänzt werden diese Daten durch Angaben zum regionalen Temperaturfeld und zu den Temperaturen im geplanten Endlagerniveau, zu den seismischen Aktivitäten in der Nähe des geplanten Endlagers, zu Vorkommen neotektonisch aktiver Störungszonen sowie zu den Hebungs- bzw. Senkungsraten von geologischen Einheiten im Umfeld des Salzstockes. Um diese Daten zu erlangen, wird bei der übertägigen Erkundung von Salzstöcken eine Kombination von Reflexionsseismik (möglichst 3D und eventuell ergänzt durch gravimetrische Messungen), Erkundungsbohrungen (inklusive Bohrlochgeophysik) und detaillierter geochemisch-mineralogischer Bearbeitung der gewonnenen Bohrkerne eingesetzt.

Ausgehend von den Besonderheiten toniger Gesteine hat die übertägige Erkundung von Tonstandorten die Aufgabe, Gebiete aus dem weiteren Auswahlverfahren auszuschließen, die intensiv metamorph überprägt sind oder mächtige Störungszonen bzw. Bereiche mit intensiv geklüftetem Wirtsgestein aufweisen. Außerdem müssen Gesteine mit einer hohen Anisotropie in der Zusammensetzung sowie in den hydraulischen und geomechanischen Eigenschaften, mit hohem C_{org} -, Karbonat- und Wassergehalten, mit niedrigen Gehalten von Tonmineralen mit hohem Sorptionsvermögen sowie Gebiete mit erhöhtem geothermischem Gradienten und mit steil einfallenden Tonschichten aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen werden. Für den Nachweis und die Charakterisierung von prinzipiell für die HAW-Endlagerung geeigneten Homogenbereichen mit hohem Tonanteil wird im Stadium der übertägigen Standorterkundung eine Kombination von geologischen Kartierungsarbeiten (unter Einschluss von tiefen Erkundungsbohrungen), geophysikalischen Messungen an der Erdoberfläche und in Bohrungen sowie hydrogeologischen und geomechanischen Untersuchungen in den Bohrungen und im Labor eingesetzt.

Die Suche nach geeigneten Endlagerstandorten im Kristallin konzentriert sich auf das Auffinden von wenig gestörten Gesteinsbereichen weit entfernt von mächtigen, hydraulisch aktiven, tief reichenden Störungszonen bzw. Grundwassermigrationsbahnen. Endlagerstandorte im Kristallin sollten nur geringe lithologische Inhomogenitäten bzw. Anisotropien in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften der Gesteine aufweisen. Für ein Endlager geeignete Bereiche in Kristallinformationen zeichnen sich durch einen relativ einfachen Internaufbau, eine geringe stofflich-strukturelle Variationsbreite sowie eine möglichst schwache, weitmaschige Klüftung, geringe Grundwasserneubildungsraten und niedrige Grundwasserfließgeschwindigkeiten aus. Zum Nachweis und zur Charakterisierung derartiger Standorte werden im Rahmen der übertägigen Standorterkundung neben geologischen Kartierungen vor allem geophysikalische Messungen an der Erdoberfläche und in Tiefbohrungen sowie hydrogeologische Untersuchungen und Laboranalysen an den Bohrkernen durchgeführt.

Eine häufig komplizierte, anisotrope In-situ-Spannungsverteilung in Kristallingesteinen setzt im Vorfeld der Standortentscheidung und bei der Projektierung des Endlagerbergwerkes eine genaue Kenntnis der Größe und Orientierung der Spannungsvektoren sowie Informationen zur möglichen räumlich-zeitlichen Entwicklung der Spannungsfelder voraus. Deshalb nehmen Untersuchungen der Orientierung der Gebirgsspannungen sowie Analysen der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine und ihres In-situ-Deformationszustandes einen breiten Raum ein.

Im Vergleich zu Salinarformationen, für die auf der Grundlage nur weniger Erkundungsbohrungen ausgehend von salzgenetischen Modellvorstellungen relativ gut abgesicherte Prognosen zum Vorkommen von möglicherweise lösungführenden Anhydriten und von

Kalisalzen innerhalb der Salzstruktur möglich sind, ist für kristalline Gesteine eine schlechte Prognostizierbarkeit des Baus und der Eigenschaften charakteristisch. Insbesondere betrifft dies das Vorkommen, die Eigenschaften und die Vernetzung von Grundwasserführenden Störungszonen und Einschlüssen.

Die für die endgültige Standortentscheidung erforderliche detaillierte Charakterisierung der Barriereigenschaften der Wirtsgesteine und des geologischen Baus des Endlagerstandortes erfolgt durch die untertägige Erkundung. Dabei werden die Daten aus Erkundungsbergwerken, die günstigstenfalls den Endlagerbergwerken am selben Standort vorgeschaltet werden, durch Untersuchungsergebnisse ergänzt, die in generischen und/oder standortbezogenen URL's gewonnen werden.

Die untertägige Standorterkundung hat das Ziel, alle Daten bereit zu stellen, die für die Durchführung der standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse (safety case) sowie für die Planung des Endlagerbergwerkes und die Optimierung des Endlagerkonzeptes erforderlich sind. Dazu werden die Gebirgs- und Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteins, die Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren, die Auswirkungen des Endlagerbaus auf das Isolationspotenzial der geologischen Barriere und die endlagerrelevanten Wechselwirkungsprozesse zwischen den Abfällen und dem Multibarrierensystem detailliert untersucht sowie vorhandene technische Konzepte zur Einlagerung im Maßstab 1:1 unter In-situ-Bedingungen getestet. Gemeinsam mit den Daten aus den übertägigen Erkundungsarbeiten bilden die Ergebnisse der untertägigen Standorterkundung die Grundlage für das zur Genehmigung des Endlagers durchzuführende Planfeststellungsverfahren und für die Szenarienbewertungen sowie für die Planung eines sicheren Bergbaubetriebs und der abschließenden Verfüll- und Verschlussmaßnahmen.

Im Rahmen der untertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten erfolgen, z. T. als Ergänzung zu den übertägigen Erkundungsarbeiten, detaillierte stofflich-strukturelle Charakterisierungen des Endlagerwirtsgesteins, Analysen des strukturgeologischen Baus der zur HAW-Einlagerung vorgesehenen Gesteinsbereiche sowie Bestimmungen der In-situ-Spannungsverhältnisse. Parallel dazu werden umfangreiche Untersuchungen endlagerrelevanter Prozesse, wie z. B. des Verhaltens des Wirtsgesteins bei der Einlagerung von Wärme entwickelnden hochradioaktiven Abfällen und Analysen des Einflusses hydraulischer, geochemischer und physikalischer Parameter auf den Transport von Radionukliden durchgeführt. Im Mittelpunkt der untertägigen Erkundungsarbeiten stehen außerdem Untersuchungen der im Nahfeldbereich ablaufenden Prozesse (Wärmeabtransport, Spannungsauf- und -abbau, Druck- und Temperatur-abhängige Deformationen), Demonstrationsversuche zur Interaktion zwischen der geologischen und den (geo)technischen Barrieren (z. B. Gasmigration, Radionuklidretardation), Weiterentwicklungen der technischen und geotechnischen Barrieren unter In-situ-Bedingungen, Untersuchungen zur Optimierung der Methoden der bergmännischen

Auffahrungen bzw. der Bohr- und Sprengverfahren sowie Demonstrationen der Einlagerungstechnik und Tests der Technik unter realen Bedingungen.

Die bei der untertägigen Standorterkundung eingesetzten Untersuchungsverfahren werden untergliedert in geologisch-geophysikalische, hydrogeologisch-hydrochemische Standortuntersuchungen sowie geomechanische und thermophysikalische Untersuchungen zur Ermittlung der standortspezifischen Gesteinsparameter bzw. Gebirgseigenschaften und Studien zu den Folgen von Auffahrungs- und Endlager-induzierten Störungen oder endlagerrelevanten gekoppelten Prozessen, komplettiert durch Untersuchungen zur Optimierung des Endlagerbaus und des Endlagerkonzeptes (konzeptbezogene Studien). In der Praxis geht man, vor allem bei Untersuchungen im Tonstein, aufgrund der vielfältigen Überlagerungs- und Wechselwirkungseffekte der unter natürlichen Bedingungen in einem Endlager ablaufenden Prozesse mehr und mehr dazu über, in den URL oder Erkundungsbergwerken multidisziplinäre, integrale wissenschaftliche Versuche (sogenannte Schlüsselexperimente) durchzuführen. Im Verlaufe dieser komplexen, häufig sehr aufwändigen Untersuchungen wird der Einfluss verschiedener Parameter (wie z. B. Spannungsfeld, Porendruck, Feuchtigkeit bzw. Wassersättigung, Temperatur) und endlagerrelevanter THMC-Prozesse auf die langzeitliche mechanische und hydraulische Integrität der geologischen Barriere analysiert. Die Synthese der verschiedenen Untersuchungen ermöglicht unter Hinzunahme von Modellberechnungen ein besseres Prozessverständnis der komplexen Zusammenhänge im System Endlager/Wirtsgestein.

Die Schlüsselexperimente berücksichtigen komplexe Vorgänge bzw. Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern und Prozessen sowie zwischen Gebirge und Endlager. Beispiele sind detaillierte Studien zu Auswirkungen von Streckenauffahrung auf das Gebirge (Mine by Test), zu Änderungen der Festigkeitseigenschaften im Nahfeld von Streckenauffahrungen bzw. Einlagerungsbohrungen sowie geophysikalische, felsmechanische, hydraulische und strukturgeologische Untersuchungen zur Charakterisierung der Auflockerungszone um untertägige Hohlräume (z. B. zur Orientierung und Ausdehnung der durch die Streckenauffahrung bzw. Spannungsumlagerung induzierten Trennflächen). Einen breiten Raum nehmen Analysen der Auswirkungen von Heater-Experimenten auf die hydraulischen und geomechanischen Gesteinseigenschaften, aber auch konzeptbezogene Versuche, z. B. zur Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren ein.

Die Untersuchungsmethoden stellen eine Kombination aus geologischen Strecken- und Bohrkernaufnahmen zur detaillierten mineralogisch-geochemisch-petrographischen und strukturell-tektonischen Charakterisierung der Wirtsgesteine, aus In-situ-Versuchen in Bohrungen und in Strecken, aus Laborversuchen und Modellberechnungen sowie aus Analysen der geomechanischen Gebirgs- und Gesteinseigenschaften zwecks Bewertung

der Stand- und Betriebssicherheit der Grubenhohlräume dar, die dem jeweiligen Wirtsgestein und dem Endlagerkonzept angepasst werden.

Schwerpunkte der untertägigen Untersuchungen in Salzformationen sind der strukturelle Baustil der Salzlagerstätte, insbesondere die Ausweisung von Homogenbereichen im Hauptsalz und die Abgrenzung von Anhydrit-führenden Schichten und Kalisalzlagern sowie die lithologische Charakterisierung und stratigraphische Einordnung der Schichtenfolge, umfangreiche geochemische Untersuchungen sowie Analysen der spezifischen geomechanischen Eigenschaften, auf deren Basis Stoffgesetze entwickelt werden.

Tonstein besitzt eine sehr komplexe mineralogische Zusammensetzung, die erheblich die Gesteins- und Gebirgseigenschaften in einem Endlagersystem beeinflusst. Schwerpunkte der untertägigen Erkundungsarbeiten im Tonstein bilden deshalb Untersuchungen zur Homogenität des Tonsteins (Faziesverteilung) und zu seinen diagenetischen Veränderungen, Analysen der komplexen Zusammensetzung von Tonstein und der daraus resultierenden Schwankungen im geomechanischen Verhalten, detaillierte Untersuchungen der Diffusions- und Retentionseigenschaften sowie die geochemische Charakterisierung der Gesteine und des Porenwassers. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung von Tonsteinen ist es notwendig, die Auswirkungen von gekoppelten Prozessen (THMC), die in einem Endlager stattfinden, auf die Barriereigenschaften besonders intensiv zu untersuchen. Die geomechanischen Eigenschaften von Tonstein machen zudem umfangreiche Untersuchungen zum Streckenausbau, zur Barrierewirkung der geologischen und geotechnischen Barrieren sowie zur praktischen Umsetzung der Endlagerkonzepte erforderlich.

In Kristallingesteinen sind im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung die Ausweisung von ungestörten Homogenbereichen ohne Kluft- und Störungssysteme sowie ihre hydraulische Charakterisierung von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus sind Transportvorgänge für Fluide in der Matrix und in Kluft-/Störungssystemen weitere Schwerpunkte der untertägigen Erkundung. Konzeptbedingt sind Analysen der Eigenschaften und der Wechselwirkungen der geotechnischen Barrieren mit den Abfällen bzw. den möglicherweise migrierenden Grundwässern weitere Untersuchungsschwerpunkte. Als Beispiele für komplexe und detaillierte untertägige Standorterkundungen in kristallinen Gesteinen dienen die Untersuchungen im Felslabor Grimsel (Schweiz), im Felslabor Stripa (Schweden), im URL Whiteshell (Kanada) und in den standortbezogenen URL's Äspö (Schweden) und ONKALO (Finnland).

In Tongesteinen und im Kristallin entsteht durch die Streckenauffahrung eine deutlich ausgeprägtere Auflockerungszone als im Salz, die die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gebirges negativ beeinflusst. Insbesondere bei der Erkundung von Ton/Tonstein-Standorten hat dies aufwändige In-situ-Studien und einen sehr kostenintensiven Ausbau der bergmännischen Auffahrungen zur Folge. Die Charakterisierung dieser

Auflockerungszonen als Bereiche mit erhöhten Wegsamkeiten für Fluide ist aufgrund ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit Gegenstand zahlreicher interdisziplinärer Versuche.

Getrennt für die Wirtsgesteinstypen wird an den Beispielen der Standorte Gorleben (Salz), Meuse/Haute Marne (Ton), Olkiluoto und Forsmark/Oskarshamn (Kristallin) die Vorgehensweise bei den über- und untertägigen Standorterkundungen sowie das dabei eingesetzte Methodeninventar erläutert.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Im Auftrag

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

(Dr. J. Hammer)
- Geologieoberrat -

(Dipl.-Geol. G. Enste)
- Geologiedirektor -
Fachbereichsleiter B 3.1

(J. Sönke)
- Geologierat -

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd.-- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): 260 S., 30 Abb., 14 Tab., 3 Anh.; Berlin.
- ANDRA (2003): Forage scientifique profonds - Synthèse FSP.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne D.RP. ADPE.03.0753: 173 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2004): Forage de reconnaissance de la formation - Synthèse FRF.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne D.RP.ADPE.04.1245: 284 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 - Referentiel du site Meuse/Haute-Marne. Tome 1 - Histoire géologique et état actuel.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): 713 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005c): Callovo-Oxfordien - Rapport de Synthèse.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne DRPADPE041110B: 219 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005d): Expérimentation DIR – Synthèse des résultats obtenus au 31/03/06.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne DRPADPE050719: 199 S.; Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005e): 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 (2007): Campagne de Reconnaissance de la Zone de Transposition 2007-2008. (Expérimentation Rzt) Spécifications de la Campagne de Sismique 2d Sp_Szt.- - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne DSPADPE060769: 87 S.; Châtenay-Malabry, France.

- BÄUERLE, G. (2000): Geochemisch-mineralogische Untersuchungen zur Genese, Lösungs- und Gasführung der Gorleben-Bank (Zechstein 3) des Salzstocks Gorleben. Dissertation, TU Clausthal-Zellerfeld, 237 S., 32 Abb., 27 Tab., 24 Taf..
- BENDER, F. (1985): Angewandte Geowissenschaften – Bd. 2. - Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften: 766 S.; Stuttgart Enke, ISBN 3-432-91021-5.
- BENDER, F. (1984): Angewandte Geowissenschaften – Bd. 3. - Geologie der Kohlenwasserstoffe, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Angewandte Geowissenschaften in Raumplanung und Umweltschutz: 674 S.; Stuttgart Enke.
- BERCKHEMER, H. (1990): Grundlagen der Geophysik. 201 S.; Wiss. Buchges., Darmstadt.
- BFE (2008): Sachplan Geologisches Tiefenlager - Konzeptteil.-- Bundesamt für Energie (BFE): 92 S.; Bern/Schweiz.
- 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.
- BORNEMANN, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen. — BfS-Schriften, 4/91: 67 S., 13 Abb., 5 Tab., 24 Anl.; Salzgitter.
- 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. -- 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.
- BRÄUER et al. (in Vorb.): Projekt Gorleben - Standortbeschreibung Gorleben – Teil IV - Geotechnische Erkundung – Abschlussbericht. Unveröff. Bericht, BGR; Hannover.

- BRAUN, R.; JAHNS, E. & STROMEYER, D. (1999): Ermittlung von Gebirgsstrukturen und -belastungen. Erdöl Erdgas Kohle, Vol 115, No.4: S. 191-197.
- CHAPMAN, N. A. & MCKINLEY, I. G. (1987): The geological disposal of nuclear waste: 280 pp; John Wileys & Sons Public., Chichester.
- GENSKE, D. (2006): Ingenieurgeologie : Grundlagen und Anwendung: 588 S.; Berlin Springer.
- GLÄSS & SCHNIER (1996): Bewertung der Verformungsmessungen in den Schächten Gorleben 1 und 2 (Salinar). – Zwischenbericht 1994/95, Tgb.-Nr. 10657/96, Hannover.
- EISENBURGER, D., OTTO, D., CHALOUPKA, H. et al. (2006): Entwicklung eines richtungs-sensitiven Georadar-Bohrlochmessverfahrens. In: Untertägige Entsorgung : siebtes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen ; 3. und 4. Mai 2006, Forschungszentrum Karlsruhe / Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE, S. 87-106, 19 Abb..
- EVERITT R., BROWN A., EJECKAM R. et al. (1998): Litho-structural layering within the Archean Lac du Bonnet batholith, at AECL's Underground Research Laboratory, Southeastern Manitoba. J. Struct. Geol.: № 9/10, P. 1291–1304.
- FECKER, E. & REICK, G. (1996): Baugeologie, 2. Aufl., Enke.
- FOLLE, S. (2007): Special features in exploration and interpretation of salt structures. In: Technical Conference Paper, SMRI Conference October 2007, Halifax, Canada: 11 S., 13 Abb.
- FILBERT, W. et al. (2004): Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (02 E 9511). Executive Summary. DBE Technology, Peine, 40 S., 3 Abb., 6 Anl., 17 Zitate.
- FRICKE, U. & ALEXANDER, W.R. (1992): The radionuclide migration experiment - Overview of investigations 1985–1990. Wettingen, Switzerland: NAGRA Techn. Rep. TB 91–04,
- FRICKE, S. & SCHÖN, J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik: 254 S.; Stuttgart, Enke in Thieme Verl. (ISBN 3-13-118331-4).

- HAMMER, J. (2003): Stand der Erarbeitung eines geologisch-hydrogeologischen Modells und einer Langzeitsicherheitsanalyse für den HAW-Endlagerstandort Schelesnogorsk bei Krasnojarsk, Sibirien, Russland. unveröff. Bericht BGR, Hannover, Tagebuch-Nr. 12132/03: 113 S., 15 Abb., 16 Tab..
- HAMMER, J. (2005): Vorschläge für ergänzende geologisch-geophysikalische Untersuchungen zur detaillierten Charakterisierung potenzieller Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle im Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombines Schelesnogorsk bei Krasnojarsk, Sibirien, Russland. unveröff. Bericht BGR, Hannover, Tagebuch-Nr. 10990/05: 70 S., 9 Abb., 9 Tab..
- HAMMER, J. (2008): Aufbau und Schutzfunktionen der granitoiden Barriere am HAW-Endlagerstandort Krasnojarsk, Russland. Unveröff. Bericht, BGR, Hannover: 71 S., 21 Abb., 13 Tab.
- HAMMER, J. SÖNNKE, J. & MINGERZAHN, G. (2009): Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Abschlussbericht, EUGENIA, Unveröff. Bericht, BGR, Hannover: 200 S., 63 Abb.
- 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.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G.(2005): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 6. Auflage: 348 S., 144 Abb., 69 Tab.; Spektrum Akademischer Verlag 2005, ISBN 3-8274-1526-8.
- 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.
- HUND, W., STIER-FRIEDLAND, G., GREVE, D. & JARITZ, W. (1991): Geowissenschaftliche Untersuchungen bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben von unter Tage. Interner Bericht ET-IB-48-REV-1, Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.

- HUNSCHE, U., SCHULZE, O., WALTER, F. PLISCHKE, I. (2003): Projekt Gorleben, Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein – Abschlussbericht, BGR, unveröffentl. Ber., Archiv-Nr. 0123873: 157 S., 80 Abb., 10 Tab.; Hannover.
- IAEA (1990): Sicherheitsprinzipien und technische Kriterien für die unterirdische Endlagerung radioaktiver Abfälle mit hoher Aktivität (engl.). IAEA, Ser. Sicherheit, Nr. 99, Wien, 32 p.
- IAEA (1993): Report on radioactive waste disposal. Technical Reports Series 349, Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (1994): Siting of geological disposal facilities.- Safety Series 111-G-4.1, Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (1999): International Atomic Energy Agency: Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste.- Technical Reports Series No. 391, 60 pp.; Vienna.
- IAEA (2003): Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes.- Technical Reports Series No. 413, Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- JAEC (1997): Guidelines on research and development in relation to geological disposal of high-level radioactive waste in Japan. Atomic Energy Commission of Japan.
- JARITZ, W. (1972): Eine Übersichtskarte der Tiefenlage der Salzstöcke in Nordwestdeutschland. Geol. Jb.: 90, S. 241-244, 1 Tafel.
- JARITZ, W. (1979): Einige Fragen sind erst nach den Bohrungen zu beantworten. Umschau 796, 179-182, 3 Abb..
- JARITZ, W. (1983): Das Konzept der Erkundung des Salzstocks Gorleben von übertage und die Festlegung von Schachtstandorten. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., Enke-Verlag, Stuttgart, 166 (1), 19-33, 5 Abb..
- JOBMANN, M., BREWITZ, W., FAHRENHOLZ, CH., FEIN, E., HAMMER, J., KEESMANN, S., KRONE, J., MRUGALLA, S., WOLF, J. & ZIEGENHAGEN, J. (2008): Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA). Abschlussbericht FKZ 02 E 9965/ 02 E 9975, DBE Technology GmbH: 133 S., 65 Abb., 35 Tab.; Peine.

- JOBMANN, M. A., P.; POLSTER, M.; SCHMIDT, H.; SCHONEBECK, M.; UHLIG, L. (2006): GENESIS - Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein.-- DBE Technology GmbH, Abschlussbericht FKZ 02E9733; Peine.
- 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.
- JOBMANN, M., BREWITZ, W., FAHRENHOLZ, CH., FEIN, E., HAMMER, J., KEESMANN, S., KRONE, J., MRUGALLA, S., WOLF, J. & ZIEGENHAGEN, J. (2008): Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA). Abschlussbericht FKZ 02 E 9965/ 02 E 9975, DBE Technology GmbH: 133 S., 65 Abb., 35 Tab.; Peine.
- KAISER, D., SPIES, T. & SCHMITZ, H. (2007): ERA Morsleben: Durchführung mikroakustischer Messungen zur Erkundung des Gebirgszustandes. Zwischenbericht, BGR, Hannover: 71 S., 24 Abb., 4 Tab..
- KAMNEV, E.N., MOROZOV, V.N., KOLESNIKOV, I.Y., TATARINOV, V.N., MRUGALLA, S., HAMMER, J. (2005): Prediction of geodynamic processes in area Nizhnekansky granitoid massif. Vortrag, Seminar, DBE Technology, Peine.
- 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, Hannover (Oktober 1974): 44 S. 1 Anl..
- 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.
- KNÖDEL, K. (Hrsg.) (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Bd. 3. Geophysik: 1102 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin Springer, ISBN 3-540-22275-8.

- 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.
- KÖTHE, A., ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R. et al. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil II. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. -- Geol. Jb., C 72: 201 S., 42 Abb., 19 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart) - ISBN 978-3-510-95963-1.
- KULL, H., JOCKWER, N., CHUN-LIANG ZHANG, WILEVEAU, Y. & PEPA, St. (2007): Measurement of thermally-induced pore-water pressure increase and gas migration in the Opalinus Clay at Mont Terri. Physics and Chemistry of the Earth 32(2007) 937 – 946.
- KUHLENKAMPFF, J., ASCHMANN, L., JACOBS, F., LINDNER, U., SCHUCK, A. & SCHWANDT, A. (1999): Komplexes Mess- und Auswertearmamentarium für die untertägige Erkundung von Problemzonen der geologischen Barriere von Endlagern und Untertagedeponien (UTD) im Salinar – Geologie, Einbeziehung von Geoelektrik und Seismik. Wiss. Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PTE: 6, S. 141-147, 2 Abb..
- KÜHN, F. & HÖRIG, B. (1995): Geofernerkundung – Grundlagen und Anwendung. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Bd 1.: 166 S., 72 Abb., 6 Tab.; Springer-Verlag, Berlin.
- LANGER, M. & VENZLAFF, H. (1988): Die geowissenschaftliche Zielsetzung der untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben. PTB informiert, 1/88, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 3-11, 11 Abb.
- LANGGUTH, H.-R.; VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden – 2., überarb. u. erw. Aufl., 1005 Seiten, 304 Abb., Springer, Berlin 2004, ISBN 3-540-21126-8.
- LAVEROV, N. P., OMELJANENKO, B. I. & VELITSCHKIN, V. I. (1994): Geologische Aspekte des Problems der Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.). Geoekologija 6: 3 – 20.
- LIEDTKE, L. , GÖTSCHENBERG, A., JOBMANN, M. & SIEMERING W. (1994): Felslabor Grimsel – Bohrlochkranzversuch - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in geklüftetem Fels, NTB 94-02: 170 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

- LÜDELING, R., ALHEID, H.-J. & SCHUSTER, K. (1999): Erforschung von Auflockerungszonen mit Hilfe seismischer Methoden. Wiss. Berichte Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PTE: 6, S. 63-78, 16 Abb..
- LÜTTIG, G. & WAGER, R. (1974): Feasibility-Studie über präsumtive Standorte einer Wiederaufbereitungsanlage für Kernbrennstoffe. unveröff. Studie, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLFb, Hannover, 40 S., 18 Anl..
- McEWEN, T. & ÄIKÄS, T. (2000): The site selection process for a spent fuel repository in Finland – summary report. Posiva-Report, 2000-15: 224 S.; Posiva Oy, Helsinki.
- McKINLEY, I.G. & ALEXANDER, W.R. (1992): Constraints on the applicability of in situ distribution coefficient values. J. Environ. Radioact. № 15.: P. 19–34..
- MILITZER, H., SCHÖN, J., STÖTZNER, U. (1986): Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. - 2., überarb. u. erw. Aufl.: 419 S.; Stuttgart, Enke - ISBN 3-432-95572-3.
- 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, Moskau (2007) 6, 6 Abb..
- 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 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): Bohrlochkranzversuch
- NAGRA (1999): Coupled transport phenomena in the Opalinus clay: Implications for radionuclide transport. NTB 99-09: 60 S.
- NAGRA (2002a): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.-- Nagra, NTB 02-03: 659 S.; Wetztingen/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 (2003): Grimsel Test Site – Investigation Phase V - Effective Field parameter EFP. 106 S.; Wettingen/Schweiz.
- NAGRA (2004): Nuclide Transport and Diffusion for Vein and Fracture Flow. NTB 04-03: 152 P.; 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. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- NAGRA (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nagra Technischer Bericht NTB 08-04. Nagra, 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. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- OECD (2009): Natural tracer profiles across argillaceous formations: the CLAYTRAC project. NEA No. 6253, Nuclear Energy Agency – OECD; Issy-les-Moulineaux, France, 361 p.
- PAHL, A. & HEUSERMANN, S. (1991): In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung von Gebirgs-spannungen - Methoden, ausgewählte Messergebnisse und deren Interpretation. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen (Hrsg.: W. Wittke), Heft 21: 81-110; Aachen.

- PEARSON, F. J., ARCOS, D., BATH, A., BOISSON, J. Y., FERNÁNDEZ, A. M., GÄBLER, H.-E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, A., GRIFFAULT, L., HERNÁN, P. & WABER, H. N. (2003): Geochemistry of water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. – Rep. FOWG Geol. Ser. 5.
- PETROV, V.A., LESPINASSE, M. & HAMMER, J.: 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..
- POSIVA (2005): Olkiluoto Site Description 2004 – volume 1. Report Posiva Oy, Olkiluoto (2005), 127 S., ISBN 951-652-135-5.
- PRICE, D. G. (2009): *Engineering Geology - Principles and Practice*: 450 P.; Springer Verlag, ISBN: 978-3-540-29249-4.
- PRINZ, H., Strauss, R. (2006): *Abriss der Ingenieurgeologie 4.*, bearb. u. erw. Aufl.: 671 S.; München Elsevier Spektrum Akad. Verl. 2006.
- PUSCH, R. (2008): *Geological Storage of Radioactive Waste – Current Concepts and Plans for Radioactive Waste Disposal*. 379 S.; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- READ, R.S., CHANDLER, N.A. & DZIK E.J. (1998): In situ strength criteria for tunnel design in highly-stressed rock mass. *Inter. J. Rock Mech. Min. Sci.* № 35 : 261–278.
- RÜBEL, A. P., SONNTAG, C., LIPPMANN, J., PEARSON, F. J. & GAUTSCHI, A. (2002): Solute transport in formations of very low permeability: profiles of stable isotope and dissolved noble gas contents of pore water in the Opalinus Clay, Mont Terri, Switzerland. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 66/8, 1311–1321.
- SAVAGE, D. (ed.): *The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste*. John Wiley & Sons Public., Chichester (1995), 437 pp.
- SCHRAMM, M., KÜHNLENZ, T., MINGERZAHN, G. & HAMMER, J. (2009): *Projekt Gorleben: Lösungen im Salzstock Gorleben – eine Dokumentation und genetische Interpretation*. Abschlußbericht, unveröffentl. Ber. BGR, Hannover 107 S., 12 Abb., 19 Tab., 15 Anl., 12 Anh..
- SCHREINER, M. & KREYSING, K. (1998): *Geotechnik Hydrogeologie.- Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Band 4, 577 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

- SCHULZE, O. (2007): Thermomechanisches und hydraulisches Verhalten von Salzgestein: Ergebnisbericht. BGR Hannover, Forschungszentrum Karlsruhe: 216 S.
- SCHUSTER, K., ALHEID, H.-J., BÖDDENER, D. (2001): Seismic investigation of the Excavation damaged zone in Opalinus Clay, Eng. Geol. 61: 189-197.
- SHEBALIN, N. V. & LEYDECKER, G. (1997): Earthquake catalogue for the former Soviet Union and borders up to 1988. European Commission, Report No. EUR 17245 EN, Nuclear Science and Technology Series, 135 pp., 13 fig., ISSN 1018-5593, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg.
- SKB (2004): RD&D-Programme 2004. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, including social science research..
- SKB (2005a): Site investigation Oskarshamn – annual report 2005.
- SKB (2005b): Site investigation Forsmark – annual report 2005.
- SKB (2005c): Äspö Hard Rock Laboratory - Characterisation methods and instruments - Experiences from the construction phase. Technical Report TR-05-11: 251 P.; Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2007): Oskarshamn site investigation method evaluation of single hole hydraulic injection tests at site investigations Oskarshamn. P-07-79: 103 S..
- SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase - SDM-Site Forsmark. Technical Report TR-08-05: 545 P.; Svensk Kärnbränslehantering AB.
- STIER-FRIEDLAND, G., RANFT, M. & BORNEMANN, O. (1997): Geowissenschaftliche Untersuchungen bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben von unter Tage - Erkundungssohle. Interner Bericht ET-IB-96, Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.
- THURY, M. et al. (1994): Geologie und Hydrogeologie des Kristallins der Nordschweiz.- Nagra Technischer Bericht NTB 93-01, Nagra, Wettingen.
- THURY, M. & BOSSART, P. (1999): Mont Terri Rock Laboratory – Results of the hydrogeological, geochemical and geotechnical experiments performed in 1996 and 1997. – Geol. Rep. Swiss natl. hydrol. geol. Surv. 23.

- WALLNER, M., MRUGALLA, S., HAMMER, J., BREWITZ, W., FAHRENHOLZ, CH., FEIN, E., FILBERT, W., HAVERKAMP, B., JOBMANN, M., KRONE, J., LERCH, CH., WARD, P., WEISS, E., ZIEGENHAGEN, J., GUPALO, T., KAMNEV, E., KONOVALOV, V., LOPATIN, V., MILOVIDOV, V. & PROKOPOVA, O. (2005): Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER) – Abschlussbericht. DBE Technology, Peine: 316 S., 158 Abb., 86 Tab., 137 Lit.-Zitate, 4 Anlagen.
- ZIRNGAST, M. (1985): Dynamik des Salzstocks Gorleben. Unveröff. Bericht, BGR Hannover, Archiv-Nr. 097673: 53 S., 10 Abb., 29 Anl.
- ZIRNGAST, M. (1990): Begrenzung und Volumen des Salzstocks Gorleben.-- BGR, unveröffentl. Ber., Archiv-Nr. 106565: 8 S., 8 Abb., 5 Anl.; Hannover.
- VIENO, T., HAUTOJÄRVI, A., KOSKINEN L. & NORDMAN, H. (1992): TVO-92 Safety Analysis of Spent Fuel Disposal, Report YJT-92-33E, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies; Helsinki.
- VIRA, J.: (2008): Preparing for licensing: progress in underground rock characterisation of Olkiluoto bedrock in Finland. Proceed. RepoSafe 2007, Braunschweig, GRS & BfS (2008), 44-51, 3 Abb..

Abkürzungsverzeichnis

AECL	Atomic Energy of Canada Limited
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
ALOHA-Projekt	EDZ-Entwicklung im Steinsalz
AMS	Anisotropic Magnetic Susceptibility
AMTS	Audiomagnetotellurische Sondierung
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. (Nationale Gesellschaft für die Behandlung radioaktiver Abfälle, Frankreich).
ANTON-Projekt	Untersuchungen zum gebirgsmechanischen Verhalten von Anhydrit und Salzton
BAMBUS-Projekt	Salzgrußkompaktion und langfristiges Verhalten des Backfill-Versatzes
BARITON-Projekt	Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton
BFE	Bundesamt für Energie
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIPS	Borehole Image Processing System
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
DBE Technology	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
DEBORA-Projekt	Untersuchungen zum Bohrlochverschluss
EB	Erkundungsbereich
EDZ	Excavation Damaged Zone
EdZ	Excavation Disturbed Zone
EMR	elektromagnetische reflexionsseismische Messungen (auch Georadar genannt)
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (Spanien)
EPG	Electromagnetic pressure tests
EUGENIA	Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen

FEBEX-Projekt	Full-scale Engineered Barriers Experiment
FRF	Forages de Reconnaissance de la Formation
FSP	Forages Scientifiques Profonds
FZKA	Forschungszentrum Karlsruhe
GIS	Geo-Informationssysteme
GOK	Geländeoberkante
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
HAW	Hochradioaktiver Abfall (high active waste)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRSN	institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
KBB	Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH
KBS-3	Schwedisches Endlagerkonzept
KEWA	Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungs-Gesellschaft
KKW	Kernkraftwerk
LASGIT	Large Scale Gas Injection Test
LIDAR	Light Detection and Ranging
Lot	Long Term Test
LTDE	Long Term Sorption Diffusion Experiment
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NEA	Nuclear Energy Agency
NTB	Nagra Technischer Bericht
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
ONKALO	Untertagelabor (Finnland)
PA	Hauptschacht (URL Meuse/Haute Marne)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PX	Hilfsschacht (URL Meuse/Haute Marne)
RACOS	Rock Anisotropy Characterization On Samples

Rex	Rock Shear Experiment
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation Index
SAR	spezifische Absorptionsrate
SGS	Swiss Geological Survey
Sicada	SKB's site characterization database
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schwedische Kernbrennstoff- und Abfallmanagement Co.)
SMA	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle
TBT	Temperature Buffer Test
TEM	Transient Electromagnetic Sounding
THMC	thermo-hydro-mechanisch-chemischen Prozesse
TR	Technical Report
TRUE	Tracer Retention Understanding Experiments
URL	Underground Research Laboratory (Untertagelabor)
USA	United States of America
UTD	Untertagedeponien
VES	Vertical Electric Sounding (Vertikale elektrische Sondierung)
VLf-EM	very low frequency magnetic field
VSP	Vertical Seismic Profiling
WIBASTA	Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barriersystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant; Endlager der USA für TRU-Abfälle, nahe Carlsbad, New Mexico
z2	Staßfurt-Folge, Zechstein
z2SF	Kaliflöz der Staßfurt-Folge
z3 HA	Hauptanhydrit, Leine-Folge
z3OSM	Gorleben-Bank, Mittleres Orangesalz, Leine-Folge

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Spezielle Auswahlkriterien für Salzformationen, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen	19
Tab. 2: Spezielle Auswahlkriterien für Ton/Tonstein, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen	21
Tab. 3: Spezielle Auswahlkriterien für Kristallin, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen	24
Tab. 4: Übersicht der hydrogeologischen Experimente im Felslabor Mont Terri (BOSSART & THURY 2008)	105
Tab. 5: Übersicht zu den Schlüsselthemen der im URL Mont Terri durchgeführten Experimente bzw. Untersuchungen (BOSSART & THURY 2008)	146
Tab. 6: Übersicht über die im Zeitraum 2008 bis 2012 geplanten wissenschaftlichen Versuche im Untertagelabor Meuse/Haute Marne (Quelle: ANDRA)	153

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Illustration der schrittweisen Vorgehensweise und des zunehmenden Detailliertheitsgrades bei der Standortauswahl für ein HAW-Endlager in kristallinen Gesteinen am Beispiel Finnlands (McEWEN & ÄIKÄS 2000)	8
Abb. 2: Veränderung der Vorstellungen zum geologischen Aufbau einer Region bei zunehmendem Detailliertheitsgrad der Erkundungsarbeiten bzw. bei steigender Anzahl von Beprobungs- bzw. Messpunkten (LAVEROV et al. 2008)	9
Abb. 3: Übersicht zur Lage der Tiefbohrungen, die für die Bewertung der Tonformationen Deutschlands hinsichtlich ihrer Eignung zur HAW-Endlagerung zur Verfügung standen (HOTH et al. 2007)	16
Abb. 4: Ergebnisse aerogeomagnetischer Messungen im Umfeld von Krasnojarsk, Südsibirien, Russland, zur Klärung der Lage von mächtigen Störungszonen in der geplanten Endlagerregion (Karte des anomalen magnetischen Feldes in nT, Maßstab 1 : 200.000, MOROZOV et al. 2007)	18
Abb. 5: Reduzierung der Verbreitungsfläche der prinzipiell für die HAW-Endlagerung geeigneten süddeutschen Opalinuston-Vorkommen infolge von ungünstigen geologischen Rahmenbedingungen (Karstgrundwasserleiter, seismische Gefährdung; Quelle BGR)	22
Abb. 6: Prinzipskizze zur Durchführung von Flugzeug-gestützten Laser-Scan-Befliegungen zwecks Erarbeitung eines hoch aufgelösten Oberflächenreliefs (z. B. zum Nachweis von mächtigen Störungszonen; Quelle BGR)	31
Abb. 7: Ergebnisse des Einsatzes eines Flugzeug-gestützten Laser-Scanners zur detaillierten Erfassung des Oberflächenreliefs am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Oskarshamn (Laxemar, SKB 2005a).	32
Abb. 8: Nachweis von mächtigen Störungszonen in einem detailliert hinsichtlich seiner Eignung für die HAW-Endlagerung untersuchten französischen Granitmassiv mittels Hubschrauber-gestützter geoelektrischer Messungen (ANDRA 2005a)	32
Abb. 9: Anwendung von PS-InSAR-Messungen zur Bestimmung von vertikalen Messpunkt-verschiebungen, in diesem Beispiel verursacht durch Nachsackprozesse oberhalb von einstürzenden Grubenräumen (Quelle BGR)	33

Abb. 10:	Typisches, noch nicht tiefenmigriertes Seismogramm für den Salzstock Gorleben (ZIRNGAST 1990). Gut erkennbar ist der Salzstocküberhang an der SE-Flanke der Salzstruktur.	38
Abb. 11:	Schematische Darstellung für die Durchführung und Auswertung von Radarmessungen in vertikalen Erkundungsbohrungen zum Nachweis lithologischer Grenzen bzw. Kontaktflächen (Quelle BGR)	41
Abb. 12:	Prinzip der Radarmessungen in einer horizontalen Erkundungsbohrung im Salz (Quelle BGR)	42
Abb. 13:	Anordnung der seismischen Profile zur Untersuchung der Salzstruktur Gorleben sowie seines Deck- und Nebengebirges (seismische Untersuchungen der Erdöl/Erdgas-Industrie - rote Linien). Die seismischen Daten dienen als Grundlage für die Bewertung des Salzstocks z. B. hinsichtlich Tiefenlage, äußerer Form, Randsenkensmächtigkeit und Deckgebirgsaufbau (BORNEMANN et al. 2008)	46
Abb. 14:	Lageplan der zur Charakterisierung des Salzstocks Gorleben und seines Umfeldes durchgeführten geologischen Erkundungsbohrungen (BORNEMANN et al. 2008)	47
Abb. 15:	Synthetische Messkurven für bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Gamma-, Sonic- und Density-Logs) im Bereich der Schichten der Staßfurt-, Leine- und Aller-Folgen in tiefen Erkundungsbohrungen am Standort Gorleben	48
Abb. 16:	Variationen der hydraulischen Durchlässigkeiten von Tonen/Tonsteinen in Abhängigkeit von ihrer Versenkungstiefe (OECD 2009)	51
Abb. 17:	Beispiel für die Anwendung seismischer Untersuchungen bei der Abgrenzung toniger Schichtpakete und beim Nachweis von mächtigen Sandsteineinlagerungen in Tonkomplexen (Quelle BGR)	53
Abb. 18:	Abschätzung der Tongehalte in drei, miteinander zu korrelierenden Erkundungsbohrungen auf der Grundlage von Gamma- und SP-Logs (HOTH et al. 2007)	54
Abb. 19:	Beispiel für komplexe geophysikalische Untersuchungen in einer Erkundungsbohrung mit mächtigen Tonschichten, nahe Hannover-Wietze (HOTH et al. 2007)	55
Abb. 20:	Nutzung von bohrlochgeophysikalischen Messungen (Sonic-Log und Gamma-Log) zur lithologischen Ansprache und Differenzierung toniger Wirtsgesteinsformationen (ANDRA 2005b)	56
Abb. 21:	In einer Erkundungsbohrung nahe Bure gemessene Veränderungen der Orientierung der Hauptspannungsvektoren im Bereich der in Frankreich für die HAW-Endlagerung vorgesehenen jurassischen Tonsedimente (ANDRA 2005b)	57

	Seite
Abb. 22: Lage der potenziellen Endlagerregion Meuse/Haute Marne am Ostrand des Pariser Beckens (ANDRA 2005b)	58
Abb. 23: Lage der in der Endlagerregion Bure niedergebrachten Tiefbohrungen und der an der Erdoberfläche gemessenen seismischen Profile (ANDRA 2005c)	60
Abb. 24: Schematischer Vertikalschnitt durch die Endlagerregion Bure mit Ausweisung der Störungszonen-Systeme bei Marne und Poissons (OECD 2009)	62
Abb. 25: Ergebnisse hydrogeologischer Untersuchungen in einer Erkundungsbohrung im Umfeld des URL Bure, inklusive EPG-Messergebnisse (ANDRA 2005b)	63
Abb. 26: Lage der zwischen 2007 und 2011 im Umfeld des URL Bure durchzuführenden seismischen Profile und Erkundungsbohrungen (Quelle: ANDRA)	64
Abb. 27: Lage der im Untersuchungsgebiet Meuse/Haute Marne geplanten tiefen Erkundungsbohrungen zur Analyse der Wirtsgesteine bzw. des Nebengebirges (Bohrungen A bis D) und der Störungszonen (Bohrungen E und F) (Quelle: ANDRA)	65
Abb. 28: Zusammensetzung und hydrogeologische Gliederung der Sedimentschichten im Umfeld des Opalinustones im Zürcher Weinland, Schweiz (NAGRA 2002a)	66
Abb. 29: Verteilung der für das schweizerische Auswahlverfahren für einen HAW-Endlager-standort zur Verfügung stehenden Daten aus Tiefbohrungen (tiefer 300 m), Seismik und Tunnelbauten (NAGRA 2005)	67
Abb. 30: Messgebiet für die 3D-Seismik im Zürcher Weinland (NAGRA 2002a)	68
Abb. 31: Ergebnisse der 3D-Seismik im zentralen Gebiet des Zürcher Weinlandes und Lage der Sondierbohrungen Benken (NAGRA 2002a)	69
Abb. 32: Schematischer Aufbau und Rahmenbedingungen für die Anwendung eines Hubschrauber-gestützten geophysikalischen Messsystems (Quelle BGR)	74
Abb. 33: Abgrenzung von mächtigen Störungszonen auf dem kristallinen Territorium Namibias mittels Hubschrauber-gestützter elektromagnetischer Messungen (Quelle BGR)	75
Abb. 34: Einsatz aerogeophysikalischer Messungen bei der geologischen Erkundung des finnischen HAW-Endlagerstandortes Olkiluoto (Mc EWEN & ÄIKÄS 2000)	76

Seite

Abb. 35:	Anwendung von überwiegend abgelenkten Erkundungsbohrungen zur Lokalisierung und Untersuchung von Störungszonen am finnischen Endlagerstandort Olkiluoto (POSIVA 2005)	77
Abb. 36:	Lage und Orientierung der am potenziellen schwedischen HAW-Endlagerstandort Forsmark niedergebrachten tiefen, größtenteils abgelenkten Erkundungsbohrungen (SKB 2005b)	77
Abb. 37:	Lage der Erkundungsbohrungen zur Untersuchung des Umfeldes des potenziellen schwedischen HAW-Endlagerstandortes Oskarshamn auf den Halbinseln Laxemar und Simpevarp (SKB 2005a)	78
Abb. 38:	Resultate geoelektrischer Messungen (VES-Methode) am Standort Oskarshamn zur Ausweisung einer Störungzone (SKB 2005a)	79
Abb. 39:	Abgrenzung einer mächtigen Störungzone im kristallinen Wirtsgestein am potenziellen schwedischen HAW-Endlagerstandort Oskarshamn auf der Grundlage geomagnetischer Untersuchungen (AMS-Methode, SKB 2005a)	80
Abb. 40:	Lage der geophysikalischen Messprofile zur Erkundung des potenziellen russischen HAW-Endlagerstandortes in der Nähe von Schelesnogorsk (bei Krasnojarsk, südliches Zentralsibirien)	81
Abb. 41:	Mittels audiomagnetotellurischer Sondierung (AMTS) erzeugtes Vertikalprofil der Widerstandsverteilung durch den potenziellen HAW-Endlagerstandort „Kamennyj“ in der Nähe von Schelesnogorsk (bei Krasnojarsk, südliches Zentralsibirien). Gut abzugrenzen sind die bläulich-grünlich-gelblich gehaltenen Bereiche geringer elektrischer Widerstände, die mächtigen Störungszonen entsprechen.	81
Abb. 42:	Lage der fünf Bohrungen am finnischen Standort Olkiluoto, in denen in einer Tiefe zwischen 300 und 800 m die In-situ-Stressbedingungen bestimmt wurden (POSIVA 2005)	84
Abb. 43:	Gerät zur Durchführung von Überbohrversuchen in tiefen Erkundungsbohrungen zur Ermittlung der Gebirgsspannungen am Standort Olkiluoto, Finnland („Borre probe“, SwedPower, POSIVA 2005)	84
Abb. 44:	Schematische Darstellung zur Anordnung der Bohrungen für den Heater-Versuch am Standort Forsmark (SKB 2005b)	86

	Seite
Abb. 45: Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Horizontal- und Vertikalverschiebungen einzelner geologisch-tektonischer Blöcke im Umfeld des potenziellen HAW-Endlagerstandortes nahe Krasnojarsk, Russland (KAMNEV et al. 2005)	87
Abb. 46: Lage der GPS-Messpunkte (Kreise) und der mikroseismischen Messstationen (grüne Vierecke) im Gebiet Olkiluoto, Finnland (POSIVA 2005)	87
Abb. 47: Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Blockverschiebungen am potenziellen HAW-Endlagerstandort Forsmark, Schweden (SKB 2005b)	88
Abb. 48: Ergebnisse der Satelliten-gestützten Messungen von deformationsbedingten Höhenverschiebungen am Standort Forsmark, Schweden (SKB 2005b)	88
Abb. 49: Durchführung bohrlochseismischer Messungen im Untertagelabor Mont Terri (Quelle BGR)	95
Abb. 50: Veränderung der mittels Ultraschall-Bohrlochseismik gemessenen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (oben) und des Poisson's ratios (unten) im Umfeld einer Strecke im Wirtsgestein Ton (Quelle BGR)	95
Abb. 51: Beispiel für die Anwendung von EMR-Messungen im Wirtsgestein Salz zum Nachweis von lithologischen Grenzflächen und Grubenbauten (Quelle BGR)	96
Abb. 52: Beispiel für die Anwendung mikroakustischer Messungen zur Lokalisierung von Mikroriss-Bildungsprozessen im Umfeld einer Strecke im Wirtsgestein Salz (rote Punkte – registrierte akustische Signale, schwarze Punkte – Position der Messeinrichtungen in den Bohrungen; Quelle BGR)	97
Abb. 53: Durchführung von Permeabilitätsmessungen im Untertagelabor Mont Terri (Quelle: BGR)	100
Abb. 54: Veränderung der mittels Permeabilitätstest gemessenen Transmissivitäten im Umfeld einer Streckenauffahrung. Deutlich zu sehen ist die Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit bzw. Transmissivität des tonigen Gesteins bei zunehmender Entfernung von der Hohlraumkontur (Quelle BGR)	100

	Seite
Abb. 55: Schematischer Aufbau eines Doppelpackers, der zur Abtrennung des Untersuchungsbereiches und zum Verpressen des Testfluids genutzt wird. Die Angaben K1 etc. bezeichnen die Kanalnummer für die Speicherung des jeweiligen Parameters	102
Abb. 56: Zeitlicher Verlauf von Injektionsrate (magenta) und Wasserdruck im Bereich des Testhorizontes (blau) im Verlaufe eines Pulse-Tests	102
Abb. 57: Beispiel für die Durchführung eines Constant Rate Tests. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf von Injektionsrate (magenta) und Wasserdruck (blau)	103
Abb. 58: Aufbau der Testausrüstung für hydraulische Packertests in Kurzbohrungen	104
Abb. 59: Unter-Tage-Photo zur Durchführung eines Überbohrversuches im URL Mont Terri (Quelle BGR)	110
Abb. 60: Prinzip der Überbohrversuche nach der BGR-Methode (Bräuer et al. in Vorb.)	110
Abb. 61: Prinzipskizze zu Konvergenzmessungen in einer Strecke und zu ihrer Auswertung (BRÄUER et al. in Vorb.)	112
Abb. 62: Prinzip und Auswertung von Extensometermessungen am Beispiel eines Dreifachextensometers (BRÄUER et al. in Vorb.)	113
Abb. 63: Pfeilerversuch in der Schachanlage Asse II (Quelle BGR)	121
Abb. 64: Nutzung von EMR-Messungen zur Rekonstruktion des strukturgeologischen Baus von Salzstöcken und zur Abstandsbestimmung zu Schichten, die für eine HAW-Endlagerung ungeeignet sind (Quelle BGR)	127
Abb. 65: Ergebnisse von Ultraschall-Messungen im URL Mont Terri zur Bewertung des Ausmaßes und der Intensität der Auflockerungszone um eine Streckenauffahrung (Quelle BGR)	133
Abb. 66: Visualisierung der im Umfeld einer Streckenauffahrung in Tonsteinen gebildeten Trennflächen (Quelle: ANDRA)	134
Abb. 67: Bandbreite der Schwankungen in der mineralogischen Zusammensetzung der für die Endlagerung vorgesehenen Tonformation im Bereich des URL Meuse/Haute Marne (Quelle ANDRA)	134
Abb. 68: Durchführung von Bohrlochverformungsmessungen zur Bestimmung des Gebirgsverformungsverhaltens (URL Mont Terri; Quelle BGR)	135
Abb. 69: Packersystem zur Durchführung von Permeabilitätsmessungen im Tonstein (Quelle BGR)	137

	Seite
Abb. 70: Nachweis anisotroper Permeabilitäten im Opalinuston des URL Mont Terri (Quelle: BGR)	137
Abb. 71: Schlitzpacker der BGR zur Bestimmung anisotroper Permeabilitäten im Tonstein (Quelle BGR)	137
Abb. 72: Beispiel für die Anwendung geoelektrischer Messungen zur Analyse der EDZ (URL Mont Terri, Quelle BGR)	141
Abb. 73: Kurzbeschreibung des Heater-Experiments in Mont Terri (BOSSART & THURY 2008)	143
Abb. 74: Anordnung der Versuchsorte und zeitlicher Verlauf der im Felslabor Mont Terri bis Ende 2008 durchgeführten In-situ-Messungen bzw. -Experimente (BOSSART & THURY 2008)	145
Abb. 75: Schema zum Aufbau des Untertagelabors Bure und zu den durchgeführten geologisch-geotechnischen Erkundungsmaßnahmen (rechts – Erkundungsnische in 445 m Tiefe; links – Ausschnitt des Erkundungsbergwerkes auf der -490 m-Sohle, Quelle ANDRA)	147
Abb. 76: Vergrößerte schematische 3D-Darstellung der Auffahrungen und Bohrungen für die untertägige Erkundung des Standortes Meuse/Haute Marne (Quelle ANDRA)	148
Abb. 77: Schlüsselexperimente im URL Meuse/Haute Marne, Phase I (Quelle: ANDRA)	149
Abb. 78: Durchführung von Ultraschallmessungen zur Erkundung der Auflockerungszone im URL Meuse/Haute Marne (Quelle BGR)	150
Abb. 79: Durchführung hydraulischer Tests mittels Mehrfachpacker im URL Bure (Quelle BGR)	151
Abb. 80: Geplante Streckenauffahrungen (magenta) in Phase II im URL Meuse/haute-Marne (Quelle ANDRA)	152
Abb. 81: Planung von Experimenten in der Galerie GED im URL Meuse/Haute Marne (Quelle ANDRA)	154
Abb. 82: Ausschnitt aus dem geologischen Modell und 3D-Bergwerksmodell für die in granitoiden Gesteinen befindliche Lagerstätte Antej bei Krasnokamensk, Sibirien.	157
Abb. 83: Beispiel für ein Kluffmodell in kristallinen Gesteinen (DFN-Modells, SKB 2008)	158
Abb. 84: Schematische Darstellung zum Vorkommen unterschiedlicher Metasomatoseprodukte im Umfeld von Störungszonen in verschiedenen Teufenniveaus	159

Seite

Abb. 85:	3D-Modell der mittels geophysikalischer Messungen am Standort Forsmark festgestellten Hauptdeformationszonen, unter Berücksichtigung der Trennflächenmineralogie (SKB 2008)	160
Abb. 86:	Korrelation zwischen der hydraulischen Durchlässigkeit (schwarze Rechtecke) und den seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Kreise – Kompressionswellen, Rhomben – Scherwellen) im Bereich der EDZ im URL Äspö Bohrung 94001; Quelle BGR)	161
Abb. 87:	Prinzip und Ergebnisse von BIP-Messungen am Standort Forsmark, Schweden (SKB 2005)	161
Abb. 88:	Kurzintervall-Packer zur Messung von Gesteinspermeabilitäten im Streckennahbereich (Quelle BGR)	162
Abb. 89:	Vorbereitung eines hydraulischen Tests zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone mittels Oberflächenpacker im URL Äspö (Quelle BGR)	163
Abb. 90:	Schematische Darstellung zur Nutzung von Oberflächenpackern bei der Analyse der hydraulischen Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen	163
Abb. 91:	Photo zum Einsatz eines Oberflächenpackers im URL Äspö (Quelle BGR)	163
Abb. 92:	Schematische Darstellung zum Prinzip von Gebirgsspannungsmessungen mittels Überbohrmethode (SKB 2005)	165
Abb. 93:	Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im Umfeld einer bergmännischen Auffahrung (URL Äspö; Quelle BGR)	168
Abb. 94:	Schematische Darstellung der Infrastruktur für das Mine-by-Experiment auf der 420 m-Sohle des URL Whiteshell im Granitmassiv Lac du Bonne, Kanada (nach READ et al. 1998)	169
Abb. 95:	Übersicht zu den In-situ-Experimenten und zur Lage der Versuchsorte im URL Äspö (Quelle BGR)	172