

**Entwicklung und Umsetzung von technischen
Konzepten für geologische Endlager in allen
Wirtsgesteinen**

EUGENIA

**AP 8 - Geotechnische Überwachungsmethoden
beim Endlagerbetrieb**

DBE-TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

**Entwicklung und Umsetzung von techni-
schen Konzepten für geologische
Endlager in allen Wirtsgesteinen**

EUGENIA

**AP 8 - Geotechnische Überwachungs-
methoden beim Endlagerbetrieb**

Wolf, J., Herklotz, M., Jobmann, M.

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

September 2008

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02 E 10346 von DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	7
2	Definition und Grundprinzipien einer Endlagerüberwachung	9
2.1	Entwicklung einer Strategie für die Endlagerüberwachung	10
2.2	Ziele einer Endlagerüberwachung	11
2.3	Phasen der Endlagerung	13
2.4	Referenzzustand	16
2.5	Parameter zur Endlagerüberwachung	17
2.5.1	Endlagerspezifische Überwachung	18
2.5.2	Überwachung der betrieblichen Sicherheit	20
2.6	Nutzung der Daten aus der Endlagerüberwachung	20
2.6.1	Bereitstellung von Informationen als Grundlage für Management- entscheidungen	22
2.6.2	Vertiefung des Systemverständnisses	24
2.6.3	Vertrauensbildung	25
2.6.4	Aufbau einer Umweltdatenbank	26
2.6.5	Einhaltung der Safeguards-Anforderungen	27
3	Messkonzepte in den einzelnen Ländern	29
3.1	Nationale Endlagerprogramme	29
3.2	Tonstein	35
3.2.1	Frankreich	35
3.2.2	Schweiz	39
3.3	Kristallin	44
3.3.1	Finnland	44
3.3.2	Schweden	51
3.4	Salzgestein	58
3.4.1	Deutschland	58
3.4.2	Andere Wirtsgesteine	63
4	Messtechnik und Messmethoden in der Endlagerüberwachung	65
4.1	Anforderungen an die Messtechnik	65
4.1.1	Messung der Messgröße	65

4.1.2	Interpretation der Messdaten	66
4.1.3	Messen, ohne den Betrieb oder die Langzeitsicherheit zu beeinträchtigen	67
4.1.4	Messen unter Endlagerbedingungen	67
4.1.5	Langzeitmonitoring	69
4.2	Auswahl der Messtechnik	71
4.3	Messprogramm	73
4.4	Messsystem	74
4.4.1	Sensoren	74
4.4.2	Übertragung von Messsignalen	78
4.4.3	Datenerfassung und Auswertung	80
5	Beschreibung ausgewählter geotechnischer Überwachungsmethoden	83
5.1	Vermessung	83
5.1.1	Höhennivellement	83
5.2	Kartierung	84
5.2.1	Fernerkundung	84
5.2.2	Geologische Kartierung	88
5.2.3	Photogeologische Kartierung	90
5.3	Geophysikalische Bohrlochmessungen	90
5.3.1	Kalibermessung (CAL)	92
5.3.2	Eigenpotenzial	93
5.3.3	Gamma-Messung	94
5.3.4	Gamma-Spektrometrie	95
5.3.5	Gamma-Spectrometer Tool	96
5.3.6	Neutron-Aktivierungsmessung	96
5.3.7	Neutron-Neutron-Messung	96
5.3.8	Compensated Neutron Tool (CNT, Neutron-Gamma Log)	97
5.3.9	Neutron-Gamma Log	97
5.3.10	Vertikales und radiales Auflösungsvermögen der einzelnen Bohrlochmessverfahren	104
5.4	Geophysikalische Methoden	107
5.4.1	Seismik	107
5.4.2	Georadar	113
5.4.3	Geoelektrik	115

5.4.4	Gravimetrie	118
5.5	Geotechnische Messungen	119
5.5.1	Temperaturmessungen	119
5.5.2	Thermophysikalische Eigenschaften der Gesteine	124
5.5.3	Felsmechanische in-situ Untersuchungen	127
5.5.4	Verschiebungsmessungen	128
5.5.5	Deformationsmessung	131
5.5.6	Kraft- und Spannungsmessungen	133
5.6	Hydrogeologie	135
5.6.1	Verfahren zur Charakterisierung der hydrogeologischen Situation innerhalb der Schichtenfolge	136
5.6.2	Erkundung und Überwachung des oberflächennahen Grundwassers	137
5.6.3	Pumpversuche	137
5.6.4	Hydraulische Bohrlochtests	139
5.6.5	Verfahren zur Beurteilung und Überwachung des hydraulischen Strömungs- und Transportprozesse	142
5.7	Hydrochemie	143
5.7.1	Beprobung	144
5.7.2	Elektrische Leitfähigkeit	145
5.7.3	pH-Wert	146
5.7.4	Redoxpotenzial	146
6	Zusammenfassende Analyse	149
6.1	Aktueller Stand der Endlagerüberwachung und erkennbare Defizite	149
6.2	Stand der Diskussion zur Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase	152
	Tabellenverzeichnis	155
	Abbildungsverzeichnis	157
	Literaturverzeichnis	159

1 Einleitung und Zielsetzung

Hinsichtlich der Endlagerüberwachung gibt es keine international übergreifenden verbindlichen Gesetze oder Maßgaben. Einzig auf EU-Ebene existiert mit dem EURATOM-Abkommen eine verbindliche Regelung für die radiologische Überwachung, die jedoch nur ein Teil der Endlagerüberwachung ist. Das EURATOM-Abkommen ist eine verbindliche Norm für den allgemeinen Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlung.

Der Artikel 35 des EURATOM-Abkommens besagt:

Jeder Mitgliedsstaat schafft die notwendigen Einrichtungen zur ständigen Überwachung des Gehalts der Luft, des Wassers und des Bodens an Radioaktivität sowie zur Überwachung der Einhaltung der Grundnormen. Die Kommission hat Zugang zu diesen Überwachungseinrichtungen; sie kann ihre Arbeitsweise und Wirksamkeit nachprüfen.

Im Artikel 36 heißt es:

Die Auskünfte über die in Artikel 35 genannten Überwachungsmaßnahmen sind der Kommission von den zuständigen Behörden regelmäßig zu übermitteln, damit die Kommission ständig über den Gehalt an Radioaktivität unterrichtet ist, dem die Bevölkerung ausgesetzt ist.

Der Artikel 37 lautet:

Jeder Mitgliedsstaat ist verpflichtet, der Kommission über jeden Plan zur Ableitung radioaktiver Stoffe aller Art die allgemeinen Angaben zu übermitteln, auf Grund derer festgestellt werden kann, ob die Durchführung dieses Plans eine radioaktive Verseuchung des Wassers, des Bodens oder des Luftraums eines anderen Mitgliedsstaates verursachen kann.

Überlegungen zur umfassenden Endlagerüberwachung werden auf internationaler und nationaler Ebene angestellt. An der länderübergreifenden Diskussion sind u. a. die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA), die Nuclear Energy Agency (NEA) und die Europäische Kommission beteiligt. Die IAEA hat als Beitrag zur Langzeitsicherheit von Endlagern die Ziele der Endlagerüberwachung in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms, den Nutzen, der aus den Messdaten gezogen werden kann, sowie die verfügbare Messtechnik in einem technischen Bericht behandelt (IAEA 2001). Die Europäische Kommission (EC) hat im Jahr 2004 einen Bericht veröffentlicht, in dem die Rolle der Endlagerüberwachung in einem stufenweisen Endlagerprogramm sowie der Beitrag, den die Endlagerüberwachung zur Entscheidungsfindung sowie zur Endlagersicherheit leisten kann, diskutiert werden (EC 2004). Dieser Bericht mit dem Titel „*Thematic Network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal of radioactive waste*“ stellt den Abschlussbericht eines von der EC geförderten Forschungsprojektes dar, im Rahmen dessen 11 europäische Endlagerinstitutionen erste Schritte erarbeitet haben, die Programme zur Endlagerüberwachung auf eine international gemeinsame Basis zu stellen. Insbesondere in der Entwicklung von Strategien zur Endlagerüberwachung sowie Zielsetzungen und Methoden zur Realisierung wurde ein erstes gemeinsames Verständnis entwickelt.

2 Definition und Grundprinzipien einer Endlagerüberwachung

Nach der Definition in IAEA (2001) ist die Endlagerüberwachung die kontinuierliche oder periodische Beobachtung und Messung von technischen und radiologischen Parametern sowie Umweltparametern als Beitrag zur Abschätzung des Verhaltens von Teilen des Endlagersystems oder der Auswirkungen des Endlagers und seines Betriebs auf die Umwelt. Diese Definition wurde von der „*Thematic Network*“ Gruppe im Grundsatz übernommen mit dem Zusatz, dass eine Überwachung auch Grundlage einer Entscheidungsfindung sein kann, in eine weitere Phase der Endlagerentwicklung einzutreten. Es ist damit jedoch keine Verbindlichkeit für die Mitgliedsstaaten verbunden (EC 2004).

Die Endlagerüberwachung spielt eine wichtige Rolle von der Entwicklung bis zur Umsetzung von Endlagerprogrammen in tiefen geologischen Formationen, denn sie liefert nützliche Informationen für eine erfolgreiche Durchführung in den verschiedenen Phasen einer Endlagerentwicklung sowie für die Verifizierung der im Vorfeld durchgeführten Langzeitsicherheitsanalyse. Ferner stellt die Endlagerüberwachung eine Unterstützung für die Entscheidungen, die in allen Phasen eines Endlagerprogramms zu fällen sind, dar (IAEA 2001).

Aufgrund des langen Zeitraums, in dem eine Gefahr von den radioaktiven Abfällen ausgeht, darf die Langzeitsicherheit nicht auf gegenwärtig herrschende behördliche Kontrollen aufbauen¹ (IAEA 2001). International wird das Prinzip der generationsübergreifenden Gleichheit verfolgt, wonach zukünftigen Generationen die Entsorgung der radioaktiven Abfälle bzw. die Nachsorge von Endlagern nicht zugemutet werden darf. Eine Prognose darüber, ob zukünftige Generation die Problemstellung der radioaktiven Abfälle bewältigen können bzw. diese Verantwortung überhaupt auf sich nehmen wollen, ist nicht möglich und ohnehin aufgrund des Gleichheitsprinzips nicht zulässig. Daher muss die Endlagerung heute derart gestaltet werden, dass eine intrinsische und passive Sicherheit gewährleistet ist und ein Endlager nach der Schließung keiner Überwachung bedarf (z. B. OECD/NEA 1982).

Jedoch scheint es ein gesellschaftliches Bedürfnis zu sein, die Endlagerüberwachung nach der Schließung fortzusetzen (IAEA 2001). Eine solche Überwachung könnte das Vertrauen der Gesellschaft in die Endlagerung stärken. In Endlagern in tiefen geologischen Formationen werden radioaktive Abfälle auf lange Zeit von der Umwelt isoliert, so dass eine Erhöhung der Radioaktivität in der Umwelt verhindert wird. Nach gegenwärtigem Stand der internationalen Diskussion sind Überwachungsmethoden, die auf invasiven Techniken basieren, zu vermeiden. Im Vordergrund steht daher die radiologische Umgebungsüberwachung sowie Hebung und Senkung der Tagesoberfläche. Letztere könnte satellitengestützt überwacht werden und könnte damit auch Safeguardsaspekte berücksichtigen.

¹ Unter behördlicher Kontrolle wird die Kontrolle eines Standorts seitens einer Behörde oder von staatlicher Seite bestimmten Institution verstanden, die aktiv (Überwachung) oder passiv (Landnutzungskontrolle) sein kann und die bei der Planung eines Endlagers einfließen kann (IAEA 1995).

2.1 Entwicklung einer Strategie für die Endlagerüberwachung

Bei der Entwicklung eines Überwachungskonzepts sollten laut den ersten Ansätzen der IAEA (2001) die Vorteile aus der Nutzung der Daten und die durch die Messung verursachten Nachteile sich die Waage halten. Folgende mögliche negative Auswirkungen sind gegen die Vorteile abzuwägen (IAEA 2001):

- Strahlenexposition der Personen, die Messungen durchführen,
- Degradierung des Materials im Endlager verursacht durch die Verzögerung, mit der die geotechnische Barriere errichtet wird, aufgrund von laufenden Überwachungsprogrammen (führt wahrscheinlich zu unvollständiger Entwicklung der Eigenschaften der technischen Barriere),
- Bildung von Fließwegen durch die Barrieren entlang von Messinstrumenten und Kabeln, die das Risiko für die Migration von Radionukliden erhöhen,
- erhöhte Wahrscheinlichkeit für menschliches Eindringen oder nachteilige Einwirkung durch natürliche oder induzierte Prozesse (z. B. Flutung) wenn das Endlager offen gehalten wird, um die Überwachung zu ermöglichen,
- Störung anderer Endlagerarbeiten durch das Monitoring.

An die ersten Ansätze der IAEA zur Endlagerüberwachung (IAEA 2001) schließen die Arbeiten der „*Thematic Network*“ Gruppe an, die u. a. in folgenden grundlegenden und international konsensfähigen Prinzipien zur Endlagerüberwachung (EC 2004) mündeten:

- Die Bewertung der Betriebssicherheit (radiologisch und nicht radiologisch) eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen soll durch Überwachungsmaßnahmen unterstützt werden. Dies ist auch der Fall für alle nuklearen Einrichtungen.
- Die Langzeitsicherheit (Nachbetriebsphase) darf nicht von Überwachungsmaßnahmen abhängig gemacht werden, schon aus Prinzip nicht und um nicht die Verantwortung an nachfolgende Generationen zu übertragen.
- Die Sicherheit eines Endlagers ist von den heute Verantwortlichen durch eine geeignete Endlagerkonzeption (dies impliziert auch die Standortauswahl) und qualitätsgesicherte Realisierung zu gewährleisten. Nach Verschluss des Endlagers muss die passive Sicherheit des Endlagersystems gewährleistet sein.
- Ein überzeugender Sicherheitsnachweis (Safety Case) muss vor Beginn des Einlagerungsbetriebes entwickelt und geprüft sein.
- Jegliche Überwachungsmaßnahmen sind so zu gestalten, dass sie keinerlei Beeinträchtigungen der Langzeitsicherheit nach sich ziehen.
- Gesellschaftliche Aspekte sollen im Zusammenhang mit Überwachungsmaßnahmen Berücksichtigung finden, um beispielsweise der Öffentlichkeit Gewissheit über die erfolgreiche Isolierung der radioaktiven Abfälle zu geben.

Ein Schlüsselthema bei der Endlagerüberwachung ist sicherlich, dass jegliche Instrumentierung und Wartung von Messinstrumenten die Integrität der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren nicht beeinträchtigen darf, d. h. dass die Langzeitstabilität nicht gestört und damit die Sicherheit nicht gefährdet ist. Grundlegende Aspekte, die sich in einer Strategie zur Endlagerüberwachung wiederfinden sollen, werden von der „*Thematic Network*“ Gruppen wie folgt angegeben (EC 2004):

- detaillierte Zielsetzung des Überwachungsprogramms,
- Kriterien für die Auswahl von Parametern oder Prozessen, die überwacht werden sollen,
- Identifizierung von Eigenschaften und Prozessen, die überwacht werden sollen,
- Angabe von detaillierten Begründungen, warum etwas überwacht werden soll,
- Angaben zur Machbarkeit und Genauigkeit bzw. Verlässlichkeit einer speziellen Überwachung,
- Identifizierung von Methoden, die zur geplanten Überwachung eingesetzt werden können, basierend auf dem aktuellen Stand der Technik,
- Angabe über Dauer und Intensität einer Überwachung sowie Kriterien, wann eine Überwachung beendet werden kann,
- Spezifizierung einer Qualitätskontrolle und einer Berichterstattung über Ergebnisse der Überwachung,
- Erkennung und Umgang mit Messfehlern,
- Festsetzung von Erwartungswerten,
- Angabe möglicher Aktionen im Falle der Überschreitung von Erwartungswerten (als Hilfestellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

Eine allgemein übergreifende und umfassende Strategie zur Endlagerüberwachung ist derzeit noch nicht verfügbar, soll aber im Rahmen eines derzeit bei der EC beantragten Forschungsprojektes mit der Kurzbezeichnung *MoDeRn* unter Beteiligung von 13 Europäischen Endlagerinstitutionen sowie Sandia (USA) und RWMC (Japan) entwickelt werden.

2.2 Ziele einer Endlagerüberwachung

Den derzeitigen internationalen Endlagerkonzepten und den Überlegungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern liegt der Gedanke zugrunde, dass eine Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase nicht erforderlich ist. Nach IAEA (2001) ist eine Endlagerüberwachung vielmehr notwendig, um die technische Umsetzung von der Planung bis zur Stilllegung des Endlagers zu unterstützen sowie das technische Sachverständnis und die Sicherheit in allen Phasen des Endlagerprogramms der Öffentlichkeit zu demonstrieren. In IAEA (2001) werden zunächst fünf allgemeine Schlüsselziele der Endlagerüberwachung formuliert:

1. Bereitstellung von Informationen, um im stufenweisen Endlagerprogramm von der Errichtung über den Betrieb bis zur Schließung Managemententscheidungen fällen zu können,
2. Vertiefung des Verständnisses über das Systemverhalten als Grundlage für die Verifizierung der Sicherheitsanalyse, Umsetzung des vertieften Verständnisses in Modelle und Simulation des Systemverhaltens,
3. Vertrauensbildung in der Gesellschaft,
4. Aufbau einer Umweltdatenbank,
5. Einhaltung der Safeguards-Anforderungen, falls das Endlager spaltbares Material enthält.

Neben den technischen und vertrauensbildenden Schlüsselzielen werden in (IAEA 2001) rein betriebliche Ziele der Endlagerüberwachung genannt, die bei jeder nuklearen Anlage erforderlich sind:

- Erfassung der radiologischer Belastung auf die Belegschaft und die Bevölkerung allgemein, um gesetzlichen und behördlichen Vorgaben nachzukommen,
- Erfassung jeglicher nicht-radiologischer Belastung auf die Umgebung (z. B. Absenkungen an der Tagesoberfläche, Änderung der Wasserqualität), um gesetzlichen und behördlichen Vorgaben nachzukommen,
- Einhaltung der allgemeinen Sicherheitsstandards hinsichtlich z. B. der Lärm-, Staub- und Gasbelastung.

Ein Hauptaspekt der ersten drei Schlüsselziele ist die Erfassung der durch die Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Endlager verursachten Änderungen, insbesondere

- die mechanische Störung infolge der Bohrungs- und Auffahrungstätigkeit,
- die hydraulische und hydrochemische Störung infolge der Auffahrung und Wasserhaltung,
- thermo-mechanische Effekte verursacht durch die Einlagerung wärmeentwickelnden Abfalls,
- die geochemische Störung aufgrund von chemischen Reaktion, die durch die Endlagererrichtung und den Endlagerbetrieb ausgelöst werden (Luftzufuhr, Einbringen von Versatz und Abdichtungen sowie des Abfalls selber).

Zur Bewertung der Änderungen werden die natürlichen „ungestörten“ Verhältnisse am Endlagerstandort herangezogen, die als Referenzzustand zu Beginn des Endlagerprogramms beschrieben werden müssen (EC 2004). Ausgehend von den oben genannten Schlüsselzielen wurden in Biurrun et al. (2001) spezielle Schutzziele aufgestellt, deren Erreichung durch geeignete Überwachungsmaßnahmen sichergestellt werden kann. Diese lauten wie folgt:

- Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit,
- Gewährleistung der Sicherheit der Bevölkerung und der Umwelt,
- Gewährleistung einer Umkehrbarkeit des Einlagerungsprozesses bis ggf. zur Rückholung (sofern diese Option im Endlagerkonzept enthalten ist),
- Einhaltung von Safeguardsanforderungen.

Diesen Schutzzielen wurden eine Reihe von Aufgaben zugeordnet, die von einer Überwachung erfüllt werden müssen, damit eine Bewertung der Einhaltung der genannten Schutzziele auf einer objektiven Basis erfolgen kann. Die Abbildung 2-1 zeigt in gelb markiert die generellen Schutzziele und in blau markiert die damit verbundenen wesentlichen Überwachungsaufgaben im Überblick.

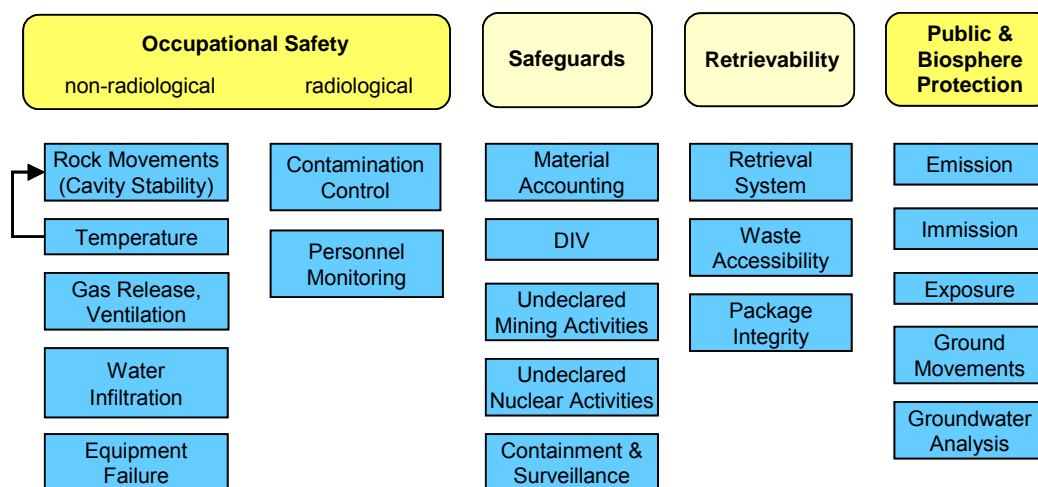


Abbildung 2-1: Überblick über generelle Schutzziele und die damit verbundenen Überwachungsaufgaben

2.3 Phasen der Endlagerung

Die zeitliche Einteilung (Phasen) eines Endlagerprojektes variiert je nach nationalem Endlagerkonzept leicht, wobei ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal die Berücksichtigung oder Nicht-Berücksichtigung einer Rückholung der Abfälle darstellt. Eine anfangs vielfach verwendete zeitliche Einteilung geht von 5 Phasen aus (Biurrun et al. 2001):

1. Standorterkundung und Bestimmung des Referenzzustandes,
2. Konstruktion des Endlagers,
3. Betriebsphase des Endlagers,
4. Schließung des Endlagers,
5. Nachbetriebsphase (mit oder ohne behördliche Kontrolle).

Die IAEA hat mit Fokus auf eine Endlagerüberwachung diese Einteilung um zwei weitere Phasen erweitert, indem sie die erste Phase der Standorterkundung sowie die Schließungsphase des Endlagers jeweils in zwei Phasen weiter unterteilt hat. Diese nun sieben Phasen eines Endlagerprogramms sind so zu verstehen, dass sie sich überlappen bzw. dass mehrere Phasen nebeneinander stattfinden können. Die Phasen werden seitens der IAEA (2001) wie folgt beschrieben:

(1) Übertägige Erkundung

Die übertägige Erkundung dient der Charakterisierung und der vergleichenden Bewertung potenzieller Endlagerstandorte. Sie soll zu einem umfassenden Verständnis des Aufbaus und der Eigenschaften der übertägigen und untertägigen Umgebung führen, das für die Sicherheitsbewertung und für die Endlagerkonzepte verwendet werden kann. Die Erkundung von der Oberfläche aus wird so lange fortgesetzt, bis an einem Standort die Datenlage ausreicht, um ein hohes Eignungspotenzial für ein Endlager festzustellen, so dass zur nächsten Phase der untertägigen Erkundung übergegangen werden kann.

(2) Untertägige Erkundung

Die untertägige Erkundung ergänzt die übertätigen gewonnenen Daten. Sie beinhaltet meist das Abteufen von Zugangsschächten oder Auffahren von Zugangstrecken, die wahrscheinlich auch schon die erste Phase der Endlagererrichtung darstellen. In dieser Phase wird eine vorläufige Planung der Zugangstrecken erstellt und es werden Daten gesammelt, um das Endlagerkonzept zu optimieren. Mit Beginn der Auffahrung wird eine signifikante Störung des natürlichen Systems verursacht.

Im Rahmen der Beteiligung der Öffentlichkeit an der Standortentscheidung, ist es sinnvoll, die Öffentlichkeit laufend über die Ergebnisse der übertägigen und untertägigen Erkundung und die Einschätzung des Eignungspotentials zu informieren.

(3) Errichtung des Endlagers

Die Errichtung des Endlagers ist die wichtigste vorbetriebliche Phase. Dazu werden weitere Erkundungsbohrungen und ggf. Schächte niedergebracht, Einlagerungstrecken und -kammern aufgefahren. Diese Maßnahmen können entweder in einer Kampagne durchgeführt werden oder schrittweise zusammen mit der Einlagerung von Abfällen. Einige Programme sehen vor, dass der Errichtung des Endlagers eine Pilotphase in einem Untertage-Labor vorangestellt wird, in der die Technologie getestet wird, um so das Vertrauen in das Endlagerkonzept zu stärken. Dieser Ansatz kann mit der Errichtung und Inbetriebnahme von Teilen des Endlagers speziell für ein intensives Langzeitmonitoring bis zur Schließung des Endlagers einhergehen.

Bereits in Phase 2 (Untertägige Erkundung) und spätestens in Phase 3 werden Daten als Entscheidungsgrundlage über die Art und die Anzahl der geotechnischen Barrieren erhoben.

(4) Einlagerung des Abfalls und Errichtung von geotechnischen Barrieren im Nahfeld

Diese Phase beginnt mit der Inbetriebnahme des Endlagers und zieht sich durch die lange Betriebsphase durch. Die Aktivitäten bestehen vorrangig in der Einlagerung des Abfalls und Errichtung der geotechnischen Barrieren. Der Zeitpunkt der Errichtung der geotechnischen

Barrieren variiert je nach Abfall- und Gesteinsart. Die nationalen Anforderungen an die Rückholbarkeit der Abfälle haben ebenfalls Einfluss auf den Zeitpunkt der Errichtung der geotechnischen Barrieren. Jedoch sollten Überlegungen hinsichtlich der Rückholbarkeit sich nicht negativ auf die Langzeitsicherheit auswirken. Z. B. kann eine Verzögerung der Erstellung von Strömungsbarrieren in direkter Nähe zu den Abfällen in einigen Konzepten zu einer weniger optimalen Leistung in der Nachbetriebsphase führen. Diese Phase wird wahrscheinlich die messintensivste Phase sein, d. h. dass die Zahl der gemessenen Parameter hier ein Maximum erreicht und danach wieder absinkt.

(5) Verfüllung der Einlagerungsstrecken und -kammern

Die Verfüllung der Felder, in denen die Einlagerung abgeschlossen ist, hängt von den nationalen Konzepten hinsichtlich der Rückholbarkeit und von den Eigenschaften des Wirtsgesteins ab. Sie könnte zeitgleich mit der Errichtung von Einlagerungsstrecken bzw. mit der Einlagerung in anderen Feldern des Endlagers ablaufen. So ist es möglich, dass die Verfüllung sofort nach Einlagerung durchgeführt wird, um Einlagerungsstrecken oder -kammern zu isolieren.

(6) Verfüllung der verbliebenen Hohlräume und Versiegung des Endlagers

Dies ist die letzte Phase der Endlagerschließung. Alle Zugangswege inklusive des Schachtes werden verfüllt und versiegelt, um die Einlagerungsfelder zu isolieren. Die Entscheidung über die Schließung des Endlagers wird von einer Reihe von Faktoren abhängen wie z. B. von technischen Überlegungen, von der öffentlichen Meinung und von den Auswirkungen der Offenhaltung auf die Sicherheit. Die Entscheidung über die Schließung ist Gegenstand der nationalen Strategie.

(7) Nachbetrieb

Die Nachbetriebsphase beginnt, wenn der letzte Zutritt zum Endlager verfüllt und abgedichtet ist. Einige Endlagerprogramme sehen nach der Schließung eine Phase mit behördlicher Überwachung vor. Obwohl die Endlagerkonzepte eine Überwachung in der Nachbetriebsphase nicht erfordern, sollte die Überwachung so lange aufrecht erhalten werden, wie die Öffentlichkeit einen Nutzen daraus ziehen kann. Jede Überwachung in der Nachbetriebsphase sollte so gestaltet werden, dass keine Beeinträchtigung der geotechnischen Barrieren und damit der Langzeitsicherheit erfolgt.

Im Rahmen einer Studie zur Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle mit dem Titel „*Concerted action on the retrievability of long lived radioactive waste in deep underground repositories*“, die von der Europäischen Kommission im Zuge des 5-ten Rahmenprogramms finanziert wurde, haben Grupa et al. (2000, 2001) ein Endlagerprogramm in insgesamt 13 Phasen (hier Zeitbereiche genannt) unterteilt. Diese Einteilung ist allerdings sehr stark an die Möglichkeit einer Rückholung der Abfälle orientiert. Die angegebenen Phasen sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Zeitbereiche eines Endlagerprogramms unter Berücksichtigung der Option einer Rückholbarkeit (nach Grupa et al. 2001)

Zeitbereich	Bezeichnung
1	Zwischenlagerung an oder in der Nähe der Erdoberfläche
2	Design und Konstruktion des Endlagers mit zumindest einem ersten Einlagerungsbereich
3	Befüllung eines Einlagerungsbereiches
4	Offenhaltung des befüllten Einlagerungsbereiches bis zum Versetzen und Versiegeln des Bereiches (Zugänglichkeit zum Abfall wahren)
5	Versetzen und Versiegeln des befüllten Einlagerungsbereiches
6	Offenhaltung des Zugangs zum Einlagerungsbereich bis zum Versetzen und Versiegeln der Einlagerungsstrecken
7	Versetzen der Einlagerungsstrecken
8	Offenhaltung der Zugangsstrecken zu den Einlagerungsstrecken bis zu deren Versetzen
9	Versetzen der Zugangsstrecken
10	Offenhaltung der Zugangsschächte
11	Versetzen und Versiegeln der Zugangsschächte
12	Nachbetriebsphase mit behördlicher Kontrolle
13	Nachbetriebsphase ohne behördliche Kontrolle

Je nach nationalem Konzept bzw. Aufteilung der jeweiligen untertägigen Einlagerungsbereiche können einige dieser Zeitbereiche auch mehrfach auftreten. Auf Grund dessen und weil aus Sicht der Endlagerüberwachung sich starke Überlappungen ergeben, wurde diese Zeiteinteilung von der „*Thematic Network*“ Gruppe nicht als Basis für Überwachungsphasen übernommen. Eine international einheitliche und übergreifende Phaseneinteilung ist derzeit aus Sicht des „Monitoring“ noch nicht verfügbar. Es wird aber davon ausgegangen, dass in dem beantragten *MoDeRn*-Projekt eine entsprechende Vereinheitlichung in dieser Frage erarbeitet werden kann.

2.4 Referenzzustand

Allen Überlegungen zur zeitlichen Einteilung eines Endlagerprogramms im Zusammenhang mit einer Überwachung liegt zu Grunde, dass der Ausgangszustand vor der Errichtung eines Endlagers auf jeden Fall zu erfassen und zu beschreiben ist. Der Ausgangs- oder Referenzzustand² beschreibt den natürlichen „ungestörten“ Zustand eines Endlagerstandorts und dient als Maßstab für die Bewertung der Auswirkungen des Endlagers auf die Umwelt und die Menschen. Nach IAEA (2001) sollte der Referenzzustand folgende Informationen umfassen:

- Grundwasserströmungsfeld im Wirtsgestein und in der benachbarten geologischen Umgebung (Verteilung des Druckspiegels, Hydraulischer Gradient, Zufluss- und Abflussgebiete),
- geochemische Eigenschaften des Grundwassers (Redox-Potenzial, Leitfähigkeit, Haupt- und Tracerelemente, natürlicher Radionuklidgehalt),

² engl. baseline conditions

- natürliche Radionuklide in Grundwasser, Oberflächenwasser, Luft, Boden und Sedimenten, Flora und Fauna,
- meteorologische und klimatische Bedingungen,
- Hydrologie des Oberflächenwassersystems inklusive des Entwässerungsnetzes und der Infiltrationsraten,
- Ökologie des natürlichen Habitats und Ökosysteme.

Nach Aussagen der „*Thematic Network*“ Gruppe ist die Bestimmung des Referenzzustands ein tragendes Element einer jeden Strategie zur Endlagerüberwachung (EC 2004). Die Gruppe stimmt mit der IAEA darin überein, dass der Beschreibung des Referenzzustands als Teil der Standortcharakterisierung möglichst früh erfolgen sollte, bevor das System durch Erkundungsbohrungen, die Schachtabteufung sowie die übertägige Erkundung signifikant gestört ist. Die Beschreibung des Referenzzustands basiert auf lokalen und regionalen Bohrkernen und auf der übertägigen Erkundung. Bei den Messungen ist davon auszugehen, dass die Messinstrumente den Messwert ggf. beeinflussen und das System bis zu einem standortspezifischen Grad stören könnten. Solche Störungen sind auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Weisen die Messungen einen steigenden, fallenden oder oszillierenden Trend auf, so ist das Referenzmonitoring fortzusetzen, bis dieser Trend zuverlässig beschrieben und die Ursachen für den Trend identifiziert sind. Es müssen genügend Daten gesammelt werden, um sicherzustellen, dass der Referenzzustand sowohl räumlich als auch zeitlich (saisonale Variationen) adäquat beschrieben ist.

Es ist allgemein anerkannt, dass die Erhebung von Referenzdaten wichtig ist sowohl für die ingenieurtechnische Planung und Errichtung des Endlagers als auch für den zu erstellenden Sicherheitsnachweis (*Safety Case*). Die Messung von Referenzdaten und das sich anschließende Überwachungsprogramm ermöglichen es insbesondere festzustellen, bis zu welchem Grad die Konstruktion des untertägigen Endlagers die Bedingungen im Wirtsgestein und im Deckgebirge beeinflusst. Dies gilt insbesondere für das chemische Milieu und die Grundwasserverhältnisse (EC 2004).

Im Rahmen einer Standorterkundung wird eine große Menge an (Referenz-)Daten erhoben, aber nicht alle Parameter, die charakterisiert werden, erfordern eine Langzeit-Überwachung und es ist wichtig, die Parameter oder Prozesse festzulegen, die einer tatsächlichen Überwachung bedürfen und nicht nur der reinen Standortbeschreibung dienen. Beispielsweise werden Stoffgesetze bzw. Eigenschaften geologischer Materialien wie Dichte, Porosität etc. bestimmt, gegebenenfalls auch in ihrer räumlichen Variabilität, bedürfen aber keiner Überwachung.

2.5 Parameter zur Endlagerüberwachung

Im Rahmen des bereits genannten *MoDeRn*-Vorhabens sollen unter anderem Kriterien zur Bestimmung überwachungsrelevanter Parameter und Prozesse in einem Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle entwickelt werden sowie entsprechende

Festlegungen vorgeschlagen werden. Darüber hinaus soll auch im Zuge einer Fallstudie die Entwicklung der Überwachung und ihre Intensität über die verschiedenen Phasen hinweg aufgezeigt und beispielhaft quantifiziert werden.

2.5.1 Endlagerspezifische Überwachung

Eine sehr allgemeine, als übergeordnet gedachte Zusammenstellung potenziell überwachungsrelevanter Parameter wurde von der IAEA (2001) gegeben (siehe Tabelle 2-2). Danach werden die zu messenden Parameter sechs verschiedenen Kategorien zugeordnet:

Tabelle 2-2: Überblickhafte Zusammenstellung potenziell überwachungsrelevanter Parameter und Prozesse in einem Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle (reproduziert nach IAEA (2001))

Kategorie / Zweck der Überwachung	Typische Parameter	Zugangsart	Typische Messmethode
(1)			
Zustand des Gruben- gebäudes Überwachung des Grubengebäudes bzw. der Stand- sicherheit von Hohlräumen	Gesteinstemperatur Verformungen an Hohlräu- men Änderung des Spannung- feldes Sickerströmung Zustand des Ausbaus Temperatur und Feuchte im Endlager Aufsättigung des Versatzes und der Dichtungsmateria- lien	Überwachung innerhalb des Endlagers inklusive Über- wachung von Bohrlöchern aus, die im Endlager abge- teuft wurden. Die Überwachung könnte Messvorrichtungen beinhal- ten, die in-situ eingebracht sind und die Daten über Radiowellen oder Erdstrom senden. In situ- / Fernüberwachung von versetzten Hohlräumen	Thermoelemente, usw. Verschiebungsdetektoren (Verformungsmessung) Spannungs-/Kraftsensoren Messung des Volumen- stroms Spannungs-/Kraftmessung Verschiedene Messmetho- den Druck- und Feuchtesen- soren, geophysikalische Verfahren
(2)			
Zustand der Abfall- gebinde und des Versatzmaterials	Spannung, Korrosionsstrom Gebindetemperatur, Feuch- te in der Nähe der Abfallgebinde Radioaktivität im Abfluss aus dem Endlager Gase, die auf die Abfallge- binde zurückzuführen sind Aufsättigung/Quelldruck im Versatz	In situ- / Fernüberwachung der Abfallgebinde In situ- / Fernüberwachung der Umgebung der Abfall- gebinde Überwachung der Radioak- tivität des aus dem Endlager rausströmenden Wassers Überwachung von radioak- tiven und anderen Gasen in der Luft im Endlager In situ- / Fernüberwachung der Umgebung der Abfall- gebinde	Extensometer, Korrosions- strommesser Verschiedene Messmethoden Verschiedene Strahlungsde- tektoren, u. a. Gammastrahlungsmessung Gasanalyse Drucksensoren, Feuchtede- tektoren

(3)

Chemische Interaktionen im Nahfeld Chemisches Milieu im Versatz und in Barrieren Verhalten der geotechnischen Barrieren Integrität der Betonstrukturen Änderung der Nahfeldumgebung Oberflächeneigenschaften der Tunnelwände Verhalten des Endlagers bei der Aufsättigung	Endlagertemperatur, Feuchte	Überwachung im Endlager	Temperatur, Feuchte (z. B. elektrische Leitfähigkeit), Druck Verschiedene analytische Techniken
	Mineralische, chemische und biologische Änderungen an den Oberflächen des Endlagers Änderung des Wassergehalts, des Porendruckes und des Chemismus im Nahfeld nach Beenden der Wasserhaltung	Regelmäßige Probenahme im Endlager Regelmäßige Probenahme oder kontinuierliche Messung im Endlager	Verschiedene Techniken basierend auf regelmäßiger Probenahme oder kontinuierlicher Messung

(4)

Änderungen in der Geosphäre Änderung der umgebenden Geosphäre Interaktion zwischen der technischen Barriere und dem Gebirgs-/Grundwassersystem Einfluss von Laugen	Grundwasserspiegel und -fließwege	Zugang über neue oder existierende Bohrungen	Wasserdruckaufnehmer: Piezometer in der gesättigten Zone, Tensiometer in der ungesättigten Zone
	Änderung der Wasserchemie, pH, Eh, gelöste Stoffe, Radioaktivität, mikrobielle Aktivität	Zugang über Bohrungen	Verschiedene Techniken: Bohrlochbeprobung, Gammastrahlenmessung
	Änderungen des mechanischen Verhaltens von Grubenbauen	Zugang über Bohrungen	Elektro-mechanische Druckmesser, Akustische Emission (AE)
	Änderung der Mineralogie	Zugang über Bohrungen	Probenahme
	Temperaturfeld	Zugang über Bohrungen	Bohrlochmessung
Spannungsfeld	Zugang über Bohrungen / Fernüberwachung	Spannungs-/Kraftsensoren sowie Mikroseismik	
Seismische Ereignisse	Im Endlager, an der Oberfläche, in Bohrlöchern	Seismographen	

(5)

Erstellung einer Umweltdatenbank	Meteorologie, Hydrologie, usw.	Übertägige Überwachung	Verschiedene Techniken
---	--------------------------------	------------------------	------------------------

(6)

Safeguards	Beeinträchtigung der geotechnischen Barrieren	Überwachung vom Endlager aus sowie von über Tage	Vor-Ort-Inspektionen, Luftbildaufnahmen, Satellitenüberwachung
-------------------	---	--	--

Die Angaben in Tabelle 2-2 werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt allerdings zum Teil kontrovers diskutiert, insbesondere wenn es um Überwachung und damit Sensorbestückung in direkter Behälternahe geht (Teil 2 der Tabelle). Derartige Überwachungsmaßnahmen werden hauptsächlich von den Institutionen angedacht, deren Endlagerkonzept ausdrücklich die Option zur Rückholung von vornherein beinhaltet, d. h., wo die Zugänglichkeit zu den Abfallgebänden gewährleistet sein muss. Steht die sofortige und vollständige Isolierung der Behälter im Vordergrund, so muss das Verhältnis vom Nutzen der Überwachung zu einer potenziellen Gefährdung der Isolation der Behälter sorgfältig abgewogen werden. Korrosion ist beispielsweise bei den zum Einsatz kommenden Materialien ein sehr langsamer Prozess, insbesondere wenn, wie im schwedischen Konzept, Kupfer als Behältermaterial verwendet wird, das sehr korrosionsbeständig ist. Der Prozess kann durchaus mehrere tausend Jahre dauern, was im Vergleich zur Betriebsdauer eines Endlagers sehr lang ist. Es ist also davon auszugehen, dass während der Betriebsdauer eines Endlagers dieser Prozess kaum mess-

bar ist, wohl aber die geotechnische Barriere durch die Sensorbestückung in ihrer Isolations-eigenschaft gestört wird. Das Nutzen-Gefährdungsverhältnis erscheint in diesem Fall nicht ausgeglichen.

2.5.2 Überwachung der betrieblichen Sicherheit

Beim Betrieb industrieller nuklearer Anlagen sind gemäß den gesetzlichen Vorschriften drei Parameterkategorien zu messen:

1. Radiologische Überwachung
 - Emissionsüberwachung Luft,
 - Emissionsüberwachung Abfluss,
 - Überwachung der Luftkontamination an den Arbeitsplätzen,
 - Hautdekontamination,
 - Personendosimetrie,
 - Lokale Dosimetrie mit passiven Dosimetern,
 - Dosisüberwachung,
 - Kontaminationskontrolle.
2. Nicht-radiologische Parameter
 - Absenkung an der Tagesoberfläche,
 - Wasserqualität.
3. Allgemeine Sicherheitsparameter
 - Lärmbelastung,
 - Staubbelastung,
 - Gasbelastung.

2.6 Nutzung der Daten aus der Endlagerüberwachung

Es wird erwartet, dass die Endlagerüberwachung regelmäßig und automatisch Messdaten liefert und zwar mindestens bis zur Schließung und wahrscheinlich auch in der Nachbetriebsphase. Das Überwachungsprogramm soll entsprechend den durch die Überwachung gewonnenen Erkenntnisse und dem Stand der Technik einfach verändert bzw. angepasst werden können. Das Überwachungsprogramm ist also kein festes oder statisches Programm. Für die Messparameter sollen bereits im frühen Stadium der Endlagerüberwachung **Erwartungswerte** festgelegt und adäquate Maßnahmen zur Gegensteuerung bei Nichteinhaltung der Erwartungswerte sollen beschlossen werden (IAEA 2001). Die Reaktion kann

von „keiner Maßnahme“, über die Änderung des Endlagerkonzepts oder des Vorgehens bis zu signifikanten Sanierungsarbeiten oder sogar bis zur Rückholung von Abfällen reichen. Damit soll in einem frühen Stadium des Endlagerprogramms demonstriert werden, dass die Auswirkungen von allen möglichen Messergebnissen eingeschätzt werden können und eine angemessene Reaktion erfolgt.

Kanada hat beispielsweise zulässige Wertebereiche oder Werte festgelegt (allowable levels or values), die als Kriterium dafür gelten, ob eine eingehende Untersuchung notwendig ist; eine sofortige Maßnahme ist notwendig, wenn ein gewisser Notwert (emergency limit value) überschritten ist (RWMC 2005).

Im WIPP³-Überwachungsprogramm wurden vom *U.S. Department of Energy* sogenannte *trigger values* für die Überwachungsparameter eingeführt. Die *trigger values* können Ereignisse, Trends, Kriterien, Raten, Wahrscheinlichkeiten, Größenordnungen, Bedingungen oder spezifische Werte sein (Wagner et al. 2002). Die Inkonsistenz mit der Konzeption eines Prozesses oder einer Bedingung ist das entscheidende Kriterium für die *trigger values*, die anzeigen ob:

- eine Bedingung im Endlagersystem sich dahingehend geändert hat, dass eine Auswirkung auf den Sicherheitsnachweis möglich ist,
- eine Untersuchung notwendig ist, um die erwartungsgemäße Funktionsfähigkeit des Endlagers weiterhin gewährleisten zu können.

Das Überschreiten eines *trigger value* löst nicht unbedingt eine konkrete Gegenmaßnahme aus, sondern gibt vielmehr Anlass für eine Untersuchung, um die Ursache für die Überschreitung zu klären, um darauf basierend eine Gegenmaßnahme für die vorliegende Einwirkung auf das Endlager zu beschließen. Die Langzeitfunktionsfähigkeit des Endlagers ist auf manche Parameteränderungen nicht sensitiv, gleichzeitig können dieselben Parameteränderungen Auswirkungen auf die FEPs⁴ oder ihre Auswahlargumente haben, so dass *trigger values* für diese Messparameter erforderlich sind. In WIPP wurden für sieben der 10 Messparameter *trigger values* festgelegt (Wagner et al. 2002). Die Herleitung der *trigger values* erfolgte in fünf Schritten:

1. Erfassung der Messparameter und ihrer Eigenschaften,
2. Herstellung eines Bezuges zwischen den Messparametern und den Faktoren des Sicherheitsnachweises (Parameter des Sicherheitsnachweises, FEP-Argumente, Konzeptionelle Modelle, Modellannahmen),
3. Herausstellen derjenigen Messparameter, die im Sicherheitsnachweis verwendet wurden; Festlegen der *Compliance Baseline*, die diejenigen Messparameter und Werte enthält, die für den Sicherheitsnachweis verwendet wurden,

³ WIPP: Waste Isolation Pilot Plant, ein Endlager im Salz für Alpha-Strahler aus der Nuklearwaffenindustrie in den USA

⁴ FEP: Features, Events, Processes: stellen die Bausteine für die Modellierung der Szenarien für den WIPP-Sicherheitsnachweis dar

4. Abschätzen der Auswirkungen von Änderungen der im Sicherheitsnachweis verwendeten Messparameter auf das Endlagersystem unter Verwendung aller verfügbarer Informationen, Erfahrungen und des existierenden Wissens,
5. Entscheidung darüber, ob *trigger values* eingeführt werden sollen durch Experten, die für den Sicherheitsnachweis verantwortlich sind. Die Experten können u. a. über folgende Punkte entscheiden:
 - Sollen die *trigger values* die Abweichung von der in Schritt 3. festgelegten *Compliance Baseline* repräsentieren?
 - Dürfen die *trigger values* zu Auswirkungen auf das Endlagersystem führen?
 - Stellen die *trigger values* die Varianz für die operativen, konzeptionellen und/oder numerischen Modelle dar?

2.6.1 Bereitstellung von Informationen als Grundlage für Managemententscheidungen

Die bei der Endlagerüberwachung gewonnenen Messdaten stellen die wesentliche Grundlage für die Entscheidungen, die im stufenweisen Endlagerprogramm zu treffen sind, dar. Ferner sind die Messdaten zum Teil für behördliche Genehmigungen erforderlich. Neben politischen Entscheidungen sind im stufenweisen Endlagerprogramm beispielsweise folgende Entscheidungen zu treffen (IAEA 2001):

- Anpassen des Endlagerentwurfs bzw. der folgenden Arbeitsschritte entsprechend der Langzeitbeobachtung der Gebirgsspannungen und der Grundwasserströmung,
- Anpassen der Abfallbehandlung, der Einlagerungstechnik, des technischen Barrierensystems und der Materialeigenschaften in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Langzeitüberwachung der eingelagerten Abfälle,
- Zurückstellen der Errichtung von Abdichtungen und Verschlussbauwerken und der Auswahl der Versatzmaterialien für die verschiedenen Phasen der Endlagerschließung, um die Abdichtungen und die Versatzmaterialien anhand von Langzeitbeobachtungen der Entwicklung der Gebirgsspannungen, der Bewegung und dem Chemismus von Wasser in Auflockerungszonen oder anhand des Kriechverhaltens von plastischen Formationen auslegen zu können,
- Zeitpunkt des Einbringens von speziellem Puffermaterial wie Zement oder Gesteinsgrus um Gebinde mit mittelradioaktivem Abfall herum oder an Zementgewölben basierend auf der Beobachtung des Degradationsverhaltens der Gebinde, der Gasproduktion und der Variationen von physikalischen und chemischen Eigenschaften von Strecken(-oberflächen) und der Gewölbewände (wie das Wachsen von neuen Mineralphasen oder Biofilmen, Oxidation oder Abplatzen des Gesteins, das die Dichtheit beeinträchtigen könnte),
- Wählen des optimalen Zeitpunkts für das Versetzen und die Versiegelung von Einlagerungsfeldern im Hinblick auf die Langzeitstabilität der Hohlräume,

- Notwendigkeit von Reparaturarbeiten oder der Sanierung des Grubenbaus, basierend auf der Überwachung von Gebirgsbewegungen, Gebirgsspannungen und der Degradierung von Gesteinsankern und anderer Stützmaterialien,
- Anpassung der Wasserhaltung, um der unterschiedlichen Flutung von verschiedenen Einlagerungsfeldern, Langzeitänderungen der Grundwasserströmungsfeldes und der Grundwasserchemie Rechnung zu tragen.

Über diese Punkte werden bei der Planung des Endlagerprogramms Annahmen getroffen, die mit größer werdender Datenmenge aus der laufenden Überwachung überprüft und ggf. modifiziert werden, so dass der Endlagerentwurf optimiert und das Vertrauen in das Endlagerkonzept gestärkt werden kann. In Ländern, die das Rückholungskonzept verfolgen, wird durch die Endlagerüberwachung die Bewertung der Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle gewährleistet. In Tabelle 2-3 wird beispielhaft eine mögliche Überwachung der im Hinblick auf die Entscheidungsunterstützung relevanten Schutzziele näher beleuchtet.

Tabelle 2-3: Überwachung der für die Entscheidungsunterstützung relevanten Schutzziele

Schutzziel	Ist wichtig für	Probleme	Lösungen / mögliche Messparameter
Integrität der eingelagerten Abfallgebände	1) Rückholbarkeit 2) Integrität des Gebindes, solange Zugang zum eingelagerten Abfall besteht	Mit fortschreitender Errichtung des Endlagers sinken die Möglichkeiten der Überwachung des Zustands der Abfallgebände: Die Zugabe von Puffermaterialien (Bentonit, Zement, Salzgrus) unterbindet den Zugang zum Abfallgebände. Mit der Errichtung von geotechnischen Barrieren werden die Möglichkeiten der Überwachung weiter eingeschränkt. Die Überwachung des Zustands der Abfallgebände würde die Beschädigung der Barrieren durch Bohrlöcher für Kabel oder Instrumente mit nachteiligen Auswirkungen auf die Integrität der Barriere mit sich bringen.	Manchmal wird ein Demonstrationsversuch auf kleiner Skala unter den selben Bedingungen (Wirtsgestein, Gebindeart) vorgeschlagen. Dieser Versuch sollte vor der Genehmigung des Endlagerbetriebs stattfinden. In einigen Endlagerprogrammen ist eine Fortsetzung des Demonstrationsversuchs beim Endlagerbetrieb vorgesehen. In einigen Endlagerprogrammen, speziell für niedrig- und mittelradioaktiven Abfall, kann die Analyse der aus dem Abfall entweichenden Gase (Beprobung so nah am Abfallbehälter bzw. am Einlagerungsfeld wie nur möglich) Hinweise zur Integrität der Abfallgebände und/oder die Leistung der bereits installierten technischen Barrieren geben.
Stabilität der Grubengebäude	Verstehen des strukturellen Verhaltens des Ausbaus. Wichtig, um die Stabilität während der Offenhaltungsphase einzuschätzen, nach der Verfüllung ist ein solches Monitoring nicht mehr nötig		Konventionelle Überwachung der untertägigen Hohlräume, Wände und Betonschalen: Gebirgsspannung, Verformung, Druck auf den Grubenausbau, Temperatur, Flüssigkeitszutritte
Integrität von Verfüllung und Abdichtungen	Auswirkungen der Verfüllung und Abdichtungen auf die Endlagerbedingungen und die Langzeitsicherheit	Eine Überwachung innerhalb der Barrieren würde die Beeinträchtigung der Barrieren durch Bohrlöcher für Kabel oder Instrumente mit nachteiligen Auswirkungen auf die Integrität der Barrieren mit sich bringen.	Messung: Spannungsfelder, Deformationen von Barrieren und der Umgebung, Änderungen der Fließraten und des Wasserchemismus, Sättigung und - im Falle von Bentonit - Quellen und Dichtigkeit, Änderungen der Gebirgsklüftung, Änderung des Temperaturfeldes.

2.6.2 Vertiefung des Systemverständnisses

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen beruht auf der Isolation der radioaktiven Abfälle von der Umwelt durch die Wirkung technischer und geologischer Barrieren. Die Umsetzung von Endlagerprogrammen wird von der Planungsphase bis zur Einlagerung und Schließung einen Zeitraum von mindestens einem Jahrhundert in Anspruch nehmen. Das Endlager wird entsprechend dem gegenwärtigen Kenntnisstand derart ausgelegt, dass die Unsicherheiten im Sicherheitsnachweis durch erhöhte (konservative) Sicherheitsanforderungen kompensiert werden. Die lange Dauer eines Endlagerprogramms sollte dazu genutzt werden, um den Kenntnisstand zu vertiefen, den Sicherheitsnachweis zu bestätigen und die Zuverlässigkeit des Konzeptes aufzuzeigen. Dazu sind intensive Untersuchungen und die Überwachung des Systemverhaltens an potenziell geeigneten Lokationen unabdingbar.

Ein weiterer Grund, Messungen durchzuführen, um das Systemverhalten zu verstehen, liegt in der Möglichkeit der Übertragung der Erkenntnisse auf andere Standorte bzw. Endlagerprogramme. Folgende Aspekte des Systemverhaltens werden seitens der IAEA (2001) als beobachtungswürdig erachtet:

- das Grundwasserströmungsfeld sollte für eine lange Zeit allgemein vorhersagbar sein, im Speziellen sollte die Änderung des Grundwasserströmungsfeldes während der Errichtung- und des Betriebs des Endlagers bei dem Gebirgsbereiche möglicherweise trocken gehalten werden müssen und später wieder geflutet werden, vorhersagbar sein,
- das chemische Milieu sollte charakterisiert und beobachtet werden. Die chemischen Eigenschaften des Grundwassers können sich ändern, da mit fortschreitender Auffahrung weitere Gebirgsbereiche für hydrogeologische Tests zugänglich werden.
- das hydraulische und mechanische Verhalten der wichtigen Gebirgsstrukturen sollte bekannt und vorhersehbar sein,
- die Entwicklung der Temperatur im Einlagerungsbereich und seiner Umgebung sollte jederzeit erkennbar sein,
- Reaktion der Untergrundstrukturen und des Grundwassersystems auf seismische Ereignisse (in einigen Ländern wichtiger als in anderen) sollten bewertbar sein,
- die Aufsättigung von Gebirgsregionen, die verfüllt und von den im Betrieb befindenden Gebirgsbereichen isoliert sind, insbesondere Aufsättigung der Puffermaterialien, deren Eigenschaften in einigen Konzepten einen wichtigen Aspekt der Langzeitleistung darstellen,
- Chemische Interaktionen zwischen der technischen Barriere und dem Gebirgs- bzw. Grundwassersystem.

Für die beiden letzten Punkte gelten die gleichen Einschränkungen wie bereits in Kapitel 2.5 aufgeführt. Steht die sofortige und vollständige Isolierung der Behälter im Vordergrund, so muss das Verhältnis vom Nutzen der Überwachung zu einer potenziellen Gefährdung der

Isolation der Behälter sorgfältig abgewogen werden. Eine messtechnische Überwachung von Barrieren in bereits verschlossenen Einlagerungsbereichen erscheint in dem Zusammenhang kontraproduktiv, da jede Sensorbestückung ein Risiko für die Erreichung der Barrierefunktion darstellt.

Die Dauer der Planung eines Endlagers ist sehr kurz im Vergleich zur Dauer der Betriebsphase und dem Zeitraum, für den der Sicherheitsnachweis zu führen ist. Die (sicherheits-)relevanten Prozesse können u. U. nicht vor der Auslegung des Endlagers beobachtet werden. Unter anderem um diese Diskrepanz zu überbrücken, werden Modelle für das Systemverhalten erstellt, die auch für den Sicherheitsnachweis verwendet werden. Diesen Modellen liegen Annahmen über Prozesse (beispielsweise Kriechen, Kluftbildung) und Parameter (z. B. Permeabilität, Redoxpotenzial, pH-Wert) zugrunde. Die Annahmen gilt es, mit Hilfe von Daten aus der Endlagerüberwachung kontinuierlich zu prüfen und zu verifizieren. Bestätigen die Messdaten die Annahmen jedoch nicht, muss entschieden werden, wie mit solchen Abweichungen im Rahmen einer Sicherheitsbewertung umzugehen ist. Was im Fall von Abweichungen von der erwarteten Entwicklung als sinnvolle Vorgehensweise erachtet werden soll, wird im Rahmen des oben genannten *MoDeRn*-Projektes erarbeitet.

2.6.3 Vertrauensbildung

Vertrauen in der Bevölkerung in die Endlagerung ist erst dann gegeben, wenn die Bevölkerung die Sicherheit hat, dass vom Endlager keine unerwünschten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ausgehen. Dieses Vertrauen ist die Voraussetzung dafür, dass notwendige Entscheidungen gefällt werden können. Es gibt mehrere signifikante Zeitpunkte in jedem nationalen Endlagerkonzept, an dem die Meinung der breiten Bevölkerung Bedeutung hat. Es ist davon auszugehen, dass – wenn eine politische Entscheidung für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen gefällt ist – eine breitere Bevölkerungsschicht wenigstens bei der Standortauswahl beteiligt werden will, sowie auch an der Verfüllung, Abdichtung und Schließung eine Mitbestimmungsmöglichkeit eingeräumt haben möchte. Die Phasen des Endlagerprogramms, in denen von einem Mitentscheidungswunsch der Bevölkerung ausgegangen werden kann, sind:

- ob von der Errichtungs- zur Betriebsphase übergegangen werden soll,
- wie die Einlagerung von Abfällen in den verschiedenen Endlagerphasen im Zeitrahmen von mehreren Dekaden erfolgen soll,
- wie eine Überwachung des Endlagerprozesses aussehen soll,
- ob und wie die eingelagerten Abfälle ggf. wieder zurück geholt werden sollen,
- ob mit der Schließung des Endlagers begonnen werden soll nach Abschluss der Betriebsphase, oder nicht,
- ob und wie ein Endlager nach seinem Verschluss mit technischen Maßnahmen weiterhin überwacht werden soll

Es ist jedoch letztlich abhängig von der länderspezifischen Situation, welche Beteiligung der Öffentlichkeit möglich ist. Es gibt bislang nur wenig Erfahrung darüber, wie das Beteiligungsbedürfnis der Öffentlichkeit überhaupt identifiziert und charakterisiert werden kann. Da es dazu bislang keine umfassenden Untersuchungen gibt, ist es Ziel eines Teilprojekts im *Mo-DeRn*-Forschungsvorhaben, Wege und Vorgehensweisen für die Umsetzung der Öffentlichkeitsbeteiligung zu finden.

Die Gesellschaft muss über den Grad der Endlagerüberwachung nach der Schließung entscheiden. Die Dauer einer solchen Überwachung lässt sich nicht vorhersagen. Darüber werden zukünftige Generationen entscheiden. Es ist davon auszugehen, dass die Endlagerüberwachung so lange fortgesetzt wird, bis die Bevölkerung genug Vertrauen in die Zuverlässigkeit des Systems hat und das Programm stoppt oder bis ein Ereignis die Fortsetzung der Überwachung ggf. unmöglich macht.

In der Schweiz beispielsweise hat die Expertengruppe *Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle* (EKRA) für die nukleare Entsorgung in tiefen geologischen Formationen das Konzept der *kontrollierten geologischen Langzeitlagerung* vorgeschlagen, das auf der Langzeitüberwachung aufbaut (EKRA 2000). Bevor ein Endlager geschlossen wird, werden Messdaten über die Funktionsfähigkeit des Endlagers und seiner Umgebung gesammelt und allgemeinverständlich aufbereitet. Die Messdaten sollen aufzeigen bzw. bestätigen, dass das Endlager erwartungsgemäß funktioniert. Erst wenn durch die Daten die Öffentlichkeit das Vertrauen in die Endlagersicherheit gewonnen hat, wird das Endlager geschlossen.

2.6.4 Aufbau einer Umweltdatenbank

Es erscheint aus jetziger Sicht hilfreich, eine Umweltdatenbank mit Informationen über den Endlagerstandort und seine Umgebung zu erstellen, die zukünftigen Entscheidungsträgern von Nutzen sein könnte. Zwar kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht eingeschätzt werden, ob die im Zusammenhang mit der Endlagerung gesammelten umfangreichen Daten, die Einzelmessungen sowie regelmäßige und kontinuierliche Messungen über einen langen Zeitraum von möglicherweise bis zu 100 Jahren beinhalten, zukünftigen Generationen überhaupt von Nutzen sind. Dennoch sollten diese Daten in einer verständlichen Datenbank erfasst und kontinuierlich gepflegt werden und somit zukünftigen Generationen zur Verfügung gestellt werden, so dass diese selber über die Nutzung der Daten entscheiden können.

Es ist eine Herausforderung, die Flut an Daten zu erfassen und zu verarbeiten, da wahrscheinlich unterschiedliche Messsysteme zum Einsatz kommen werden, die mit unterschiedlichen Datenauswertungsprogrammen oder Vorhaltungsprogrammen kompatibel sind. Die Umweltdatenbank muss also über geeignete Schnittstellen verfügen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich über den extrem langen Messzeitraum die Rechnerprogramme und die Datenbankstandards weiterentwickeln werden.

2.6.5 Einhaltung der Safeguards-Anforderungen

Sobald ein Endlager spaltbares Material wie Brennelemente oder an Plutonium reiche Abfälle enthält, sind entsprechende Absicherungsmaßnahmen zu treffen. Auch nach Schließung des Endlagers kann der radioaktive Abfall nicht als unwiederbringlich deklariert werden, so dass die Absicherungsmaßnahmen weiter aufrechterhalten werden müssen (IAEA 2001). Die Überwachung im Sinne der Safeguards soll im Wesentlichen sicherstellen, dass keine illegale Entfernung des radioaktiven Abfalls erfolgt. Die Art der Kontrolle bzw. die Art der Überwachung der Einhaltung der Safeguardsanforderungen wird im Rahmen einer internationalen Safeguardsgruppe festgelegt und an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

3 Messkonzepte in den einzelnen Ländern

Zwischen den beteiligten Organisationen und Ländern besteht weitgehend Einigkeit über die Motivation für die Endlagerüberwachung und die Gültigkeit der von der IAEA formulierten Schlüsselziele der Endlagerüberwachung (IAEA 2001). Die nationalen Strategien für die Endlagerüberwachung verfolgen darüber hinaus **spezifische Ziele**, die maßgeblich vom nationalen Endlagerkonzept abhängen, und stellen damit länderspezifische Lösungen dar.

3.1 Nationale Endlagerprogramme

Weltweit hat sich das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen als die nach derzeitigem Kenntnisstand technisch und sicherheitstechnisch optimale Entsorgung von Wärme entwickelnden Abfällen durchgesetzt. Bedingt durch das natürliche Angebot setzen die nationalen Endlagerkonzepte auf unterschiedliche Wirtsgesteine. Frankreich und Belgien planen die Endlagerung in Tonstein. In Finnland und Schweden ist Kristallin das bevorzugte Wirtsgestein. In der Schweiz und in Spanien wird, genauso wie in Japan, Tonstein und Kristallin als Wirtsgestein untersucht. Die deutsche Endlagerkonzeption sieht ein Endlager im Salzstein vor. In den USA ist die Endlagerung in Tuffstein geplant. Großbritannien bevorzugt bislang kein bestimmtes Wirtsgestein. Die Rahmenbedingungen, die für die bei Endlagerüberwachung eingesetzte Messtechnik gelten, sind durch das Wirtsgestein vorgegeben. Die Tabelle 3-1 zeigt die endlagerrelevanten Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine.

Tabelle 3-1: Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine (BGR 2007)

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

günstige Eigenschaft
 ungünstige Eigenschaft
 mittel

Während die Eigenschaften von Salz eher isotrop sind, weisen kristalline Gesteine und Tonstein eine ausgeprägt anisotrope hydraulische Durchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit, u. a. auf, weshalb diese Parameter im Kristallin und Tonstein richtungsabhängig zu messen sind. Tonstein hat einen natürlichen Wassergehalt und ist quellfähig. Diese Eigenschaften sind beispielsweise im Salz vernachlässigbar. Der Wassergehalt begünstigt den Prozess der Korrosion, weshalb Metallbestandteile von Messsystemen im Wirtsgestein Tonstein oder Kristallin eher korrodieren können im Vergleich zur Salzumgebung.

Neben dem Wirtsgestein haben noch andere nationale Faktoren des Endlagerprogramms Einfluss auf die Strategie zur Endlagerüberwachung (Mayer 2008):

- rechtlicher und regulatorischer Rahmen,
- hydrogeologische Verhältnisse im Deckgebirge bzw. in den benachbarten geologischen Formationen,
- Menge und Art des radioaktiven Abfalls,
- Abfallprodukte,
- Abfallgebilde,

- Endlagerungskonzept:
 - Rückholbarkeit,
 - Zeitdauer von der Errichtung bis zur Schließung,
 - Art und Funktionsweise der technischen Barriere.
 - Errichtung eines Untertagelabors, Testversuche, Pilotversuche,...
 - Phasen des Endlagerprogramms und Ablauf (parallel, nacheinander),
- Endlagerentwurf:
 - Zugangsschacht oder -strecke,
 - Einlagerungskammern oder -bohrlöcher,
- Wärmemanagement,
- Erwartungen der Interessensvertreter.

Die nationalen Endlagerprogramme sind unterschiedlich weit fortgeschritten. Sie reichen von generellen Machbarkeitsstudien unter den länderspezifischen Bedingungen (Frankreich, Spanien und Japan) bis zur Auswahl von direkten Standorten (Olkiluoto in Finnland, Yucca Mountain in den USA) und den Betrieb von untertägigen Versuchseinrichtungen (Untertagelabor Bure in Frankreich, Untertagelabor Hades (Mol) in Belgien und Mont Terri in der Schweiz).

In mehreren Ländern ist die übertägige Erkundung mehrerer Standorte vorgesehen, in Schweden wird an zwei Standorten eine untertägige Erkundung inklusive Tiefbohrungen durchgeführt. Die Schweiz plant frühestens ab 2020 eine untertägige Erkundung an zwei Standorten. Sofern die Eignungs- und Sicherheitsanforderungen an mehreren Standorten erfüllt werden, erfolgt die Auswahl oft unter sozioökonomischen Gesichtspunkten. So wurde in Finnland ein Standort in der Nähe bestehender Kernkraftwerke ausgewählt und auch in Schweden liegen die favorisierten Endlagerstandorte in der Nähe von Kernkraftwerken, wo einerseits die Bevölkerung weniger Vorbehalte gegen nukleare Anlagen hat und andererseits eine Infrastruktur bereits existiert.

Genauso wie die Endlagerprogramme sind auch die Programme zur Endlagerüberwachung unterschiedlich weit fortgeschritten. Die Tabelle 3-2 beinhaltet einen Überblick über den Stand der Endlagerprogramme und der Endlagerüberwachung in verschiedenen Ländern.

Tabelle 3-2: Endlagerprogramme in verschiedenen Ländern: Stand des Endlagerprogramms und der Endlagerüberwachung (in Anlehnung an RWMC (2005))

Land	Abfallform	Wirtsgestein	Tiefe des Einlagerungsbereichs	Stand des Endlagerprogramms	Stand des Strategie für die Endlagerüberwachung
USA	Alpha-Strahler aus der Atombombenproduktion	Salz	~ 650 m Tiefe	1999 in Betrieb gegangen	Compliance monitoring, record keeping, passive institutional controls
	Brennstäbe Verglaste Abfälle	Tuff	200 – 425 m	Yucca Mountain wurde im Jahr 2002 vom US-Kongress als Endlagerstandort festgelegt. Im Juni 2008 wurde der Antrag auf Erteilung der Betriebsgenehmigung gestellt, der momentan begutachtet wird.	
Frankreich	Brennstäbe Verglaste Abfälle	Granit Ton	400 – 1000 m	Im Jahr 2000 hat die offizielle Standortsuche neu begonnen. Im Untertagelabor Bure wird die Eignung von Tonsteinen untersucht. Die im Jahr 2005 veröffentlichten Machbarkeitsstudien bescheinigen dem Wirtsgestein Tonstein und Granit gleich gute Eignung für die Endlagerung. Die Standortsuche beschränkt sich jedoch seit 2006 auf das Wirtsgestein Callovo-Oxfordian-Ton und damit auf die Gemeinde Bure. Der Antrag auf Betriebsgenehmigung soll bis 2014 gestellt werden.	Als Teil der im Jahr 2005 veröffentlichten Machbarkeitsstudie für die Endlagerüberwachung im Tonstein und Granit wurde ein FuE-Programm für die Endlagerüberwachung definiert; ein Endlagerüberwachungsprogramm wird als Teil der Antrags auf die Genehmigung eines tiefen geologischen Endlagers im Jahr 2014 von der ANDRA vorgelegt (Mayer 2008).
Deutschland	Brennstäbe Verglaste Abfälle	Steinsalz	660 – 900 m	Erkundung des Standortes Gorleben wurde 2000 nach der Abteufung der Schächte ausgesetzt, um ausstehende Fragen zu klären.	
Belgien	Brennstäbe, hoch radioaktive Abfälle	Ton	~ 220 m	Untersuchungen im Untertagelabor Mol laufen. Die Inbetriebnahme eines Endlagers ist für 2035 geplant.	
Finnland	Brennstäbe	Granit	~ 500 m	Olkiluoto wurde als Endlagerstandort im Jahr 2001 vom finnischen Parlament festgelegt. Als Teil der Erkundung des Standorts wird momentan das Untertagelabor Onkalo errichtet, das 2011 fertiggestellt sein soll. Das Genehmigungsverfahren und der Bau des Endlagers sollen bis 2020 abgeschlossen sein.	Beschreibung des Referenzzustands abgeschlossen. Standorterkundung in Olkiluoto läuft.

Land	Abfallform	Wirtsgestein	Tiefe des Einlagerungsbereichs	Stand des Endlagerprogramms	Stand des Strategie für die Endlagerüberwachung
Schweden	Brennstäbe	Granit	~ 500 m	<p>Eine Machbarkeitsstudie wurde für 8 Standorte durchgeführt. Erkundung von zwei Standorten Oskarshamn (Östhammar) sowie Forsmark zwischen 2000 und 2007, z.Z. wird die Ergebnisanalyse, die Sicherheitsbewertung sowie eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt. Weitere Informationen zur Eignung des Granits sowie zur Erprobung der Einlagerungstechnik werden im Untertagelabor Äspö bei Oskarshamn gewonnen. Entscheidung für einen Endlagerstandort (zwischen Oskarshamn und Forsmark): 2009, Aufnahme des Endlagerbetriebs frühestens 2020</p>	Standorterkundung Forsmark und Oskarshamn
Japan	Verglaste Abfälle	Granit Sedimentgestein	> 300 m	<p>Im Jahr 2000 wurde ein Gesetz über die Endlagerung verabschiedet. Momentan führt die japanische Endlagerorganisation NUMO ein Standortauswahlverfahren zur Identifizierung potenziell geeigneter Standorte durch. Hohe Priorität hat dabei die Akzeptanz in der Bevölkerung. Die Standortauswahl wird im Jahr 2023 – 2027 getroffen.</p>	
Großbritannien				<p>Eine Expertenkommission wurde mit der Erarbeitung der Entsorgungsstrategie für hochradioaktive Abfälle beauftragt, die eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgeschlagen hat. Konzeptionelle Planungen hierzu befinden sich in der Vorbereitung. Weiterhin werden Alternativen wie Transmutation oder Recycling geprüft.</p>	
Schweiz	Verglaste Abfälle aus der Wiederaufbereitung sowie Uran- und MOX-Brennelemente	Opalinuston (Kristallin)		<p>Es wird das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung verfolgt. Machbarkeitsstudien für ein Endlager im Kristallin und im Opalinuston wurden vorgelegt. Derzeit läuft das Standortauswahlverfahren.</p>	<p>Die Endlagerüberwachung ist in dem Kernenergiegesetz reguliert. An mindestens zwei geeigneten Standorten soll frühestens ab 2020 eine untertägige Standorterkundung beginnen.</p>

3.2 Tonstein

3.2.1 Frankreich

3.2.1.1 Historie und aktueller Stand des Endlagerprogramms

1998 wählte die französische Regierung Meuse/Haute-Marne, gelegen in der Gemeinde Bure, als Standort für ein Untertagelabor im Tonstein aus. Vorausgegangen waren ein Standortscreening und ein Mediationsverfahren zur Ermittlung freiwilliger Standortgemeinden in geologisch geeigneten Regionen. Nach einer eingehenden Standorterkundung wurde 1999 mit der Errichtung des Untertagelabors begonnen. Im Jahr 2005 wurden die bis dahin gewonnenen Ergebnisse in ANDRA (2005a) in Form einer Machbarkeitsstudie zur Endlagerung in Tonstein zusammengefasst. Als zweite Option wird in Frankreich die Endlagerung in Granit verfolgt. Mangels eines eigenen Untertagelabors in Granit wurden Messdaten aus Untertagelabors in anderen Ländern verwendet, um auch für die Endlagerung im granitischen Wirtsgestein eine Machbarkeitsstudie zu erstellen (ANDRA 2005b). Die Machbarkeitsstudien rechnen dem Tonstein und dem Granit eine gleich gute Eignung als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle zu.

Der Plan für das langfristige Management von radioaktiven Stoffen und Abfällen vom 28. Juni 2006 sieht ein Auswahlverfahren für verschiedene Standorte vor, mit der Vorgabe, dass vorgeschlagene Standorte in einer geologischen Formation liegen müssen, die in einem Untertagelabor eingehend erkundet wurde. Damit schränkt das Gesetz indirekt die Standortsuche auf den im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne erkundeten Callovo-Oxfordian-Ton bzw. das Gebiet von Bure ein. Laut Gesetz ist der Antrag auf die Betriebsgenehmigung bis spätestens 2015 vorzulegen und die Inbetriebnahme soll 2025 erfolgen, vorausgesetzt, dass das Parlament dem vorgeschlagenen Endlagerstandort zustimmt.

3.2.1.2 Wirtsgestein und Endlagerkonzept

Frankreich verfolgt das Konzept der Endlagerung im Wirtsgestein Callovo-Oxfordian-Ton. Basierend auf dem französischen Gesetz wird der reversible Ansatz für die Endlagerung in tiefen geologischen Schichten verfolgt. Kernstück des reversiblen Ansatzes ist, dass die Grenzen des gegenwärtigen Wissenstands eingeräumt werden und den zukünftigen Generationen das Recht vorbehalten wird, veranlasst durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse die eingelagerten Abfälle zurückzuholen, in die Ausgestaltung der Endlagerung einzureifen oder sogar die Endlagerung neu auszurichten. Daher ist die Endlagerung flexibel und modular umzusetzen, so dass sich zukünftigen Generationen Eingreifmöglichkeiten bieten. Für das Jahr 2016 wird ein Gesetz erwartet, das die Rückholbarkeit der Abfälle spezifiziert. Im Gesetz vom 28. Juni 2006 ist festgelegt, dass die Rückholbarkeit über mindestens 100 Jahre gewährleistet werden muss; der genaue Zeitraum ist im Genehmigungsantrag festzulegen.

3.2.1.3 Regulatorischer Rahmen

In Frankreich sieht das Gesetz ein Überwachungsprogramm während der Errichtung bis zur Schließung vor, des weiteren können einige Überwachungseinrichtungen nach der Schließung weiter betrieben werden (Bodenez et al. 2008). Laut dem Umweltgesetz (*code de l'environnement*) ist ein Überwachungsprogramm die Voraussetzung für die Rückholung der Abfälle. Das Umweltgesetz gibt auch die Ziele der Endlagerüberwachung vor.

In der Machbarkeitsstudie *Dossier Argile 2005* (ANDRA 2005a) werden FuE-Arbeiten auf dem Gebiet der Messsysteme definiert, die von der ANDRA im Jahr 2007 begonnen wurden.

Das Gesetz vom 28. Juni 2006, das in das Umweltgesetz einfließt, sieht vor, dass ein Programm für die Endlagerüberwachung zusammen mit dem Antrag auf die Betriebsgenehmigung diskutiert, aufgestellt und spätestens im Jahr 2015 eingereicht werden soll.

3.2.1.4 Ziele der Endlagerüberwachung

Ein wesentliches Ziel ist die Gewährleistung der Rückholbarkeit. In Bodenez et al. (2008) werden folgende Ziele der Endlagerüberwachung genannt:

- Beitragen zur Sicherheit während der Betriebsphase,
- Verfolgen der Entwicklung von Parametern, die den Zustand der Installationen im Endlager und den Zustand des Wirtsgesteins charakterisieren,
- Erfassen der Entwicklung der Phänomene, die sich auf den Zustand der Installationen und des Wirtsgesteins auswirken.
- Wissenserweiterung und Aufzeigen, dass die vorhergesagten Prozesse und Phänomene eingetroffen sind bzw. richtig eingeschätzt wurden,
- Bereitstellung von Daten für den Betrieb, die Planung und die Rückholbarkeit der Abfälle.

Nach EC (2004) werden in Frankreich mit der Endlagerüberwachung folgende Ziele verfolgt:

- Bereitstellung von Wissen über die wichtigsten Prozesse, die den Zustand und die Entwicklung des Endlagers beeinflussen,
- Charakterisierung des Zustands und der Entwicklung des Endlagers in jeder Phase der Endlagerung,
- Vergleichen der Messdaten mit dem verfügbaren Wissen über die Entwicklung des Endlagers, mit Modellergebnissen sowie potenziellen zukünftigen Anforderungen.

3.2.1.5 Strategie

Es wird vorausgesetzt, dass die Endlagerüberwachung die Endlagersicherheit nicht beeinträchtigt. Die Endlagerüberwachung ist ein integraler Bestandteil des auf die Rückholbarkeit der Abfälle aufgebauten französischen Endlagerprogramms (ANDRA 2001), denn sie ist das Instrument zur Gewährleistung der Rückholbarkeit. Ferner liefert die Endlagerüberwachung die notwendigen Informationen, um laufend über das weitere Vorgehen im Endlagerprogramm zu entscheiden. Zu den Optionen gehören das Fortsetzen oder Einstellen der Einlagerung sowie die Rückholung der eingelagerten Abfälle. Mit Fortschreiten der Abfalleinlagerung nimmt der Grad der Rückholbarkeit von Stufe 1 bis Stufe 5 ab (ANDRA 2001). Die in der Phase der Abfalleinlagerungen zu treffenden Entscheidungen gehen mit einer zunehmenden Reduzierung der Rückholbarkeit einher, was durch zunehmendes Vertrauen in die Endlagerungstechnik, gestützt durch fundiertes Wissen und Messdaten aus der Endlagerüberwachung, begründet sein muss.

Ein wichtiger Bestandteil der Endlagerüberwachung sind gebirgsmechanische Experimente und Messungen im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne, die unter realen Bedingungen durchgeführt werden und bereits Messdaten liefern, bevor das Endlager gebaut ist. Diese Daten bilden die Grundlage für die konzeptionelle Beschreibung der gebirgsmechanischen Prozesse und für erste Prozess- und Vorhersagemodelle, die später anhand von im Laufe der Endlagerüberwachung gewonnenen Messdaten sukzessive verifiziert bzw. nachkalibriert werden. Die Modelle spielen eine wichtige Rolle für den Sicherheitsnachweis, da die Planung und Umsetzung eines Endlagerprogramms in einem deutlich kürzeren Zeitraum erfolgen muss im Vergleich zu dem Zeitraum, über den der Sicherheitsnachweis geführt wird, so dass der Sicherheitsnachweis u. a. aus rein zeitlichen Gründen nicht nur auf Messdaten aufgebaut werden kann.

Die ANDRA plant, Einlagerungskammern oder -strecken in Pilotanlagen mit Messinstrumenten auszustatten und zu überwachen, um Wissen über die Entwicklung der technischen Barriere und das Nahfeld zu erhalten (EC 2004). Solche Pilotanlagen sollen in verschiedenen Bereichen des Endlagers entstehen.

Mit der Machbarkeitsstudie für ein Endlager im Tonstein bzw. im Granit wurde auch eine Machbarkeitsstudie für die Endlagerüberwachung vorgelegt (ANDRA 2005a). Ein Programm für die Endlagerüberwachung wird als Teil der Antrags auf die Genehmigung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen spätestens im Jahr 2015 von der ANDRA vorgelegt. Der Entwurf des Genehmigungsantrags wird im Jahr 2012 vorgelegt, so dass Zeit für die Diskussion des Entwurfs bleibt. Das Endlagerüberwachungsprogramm gliedert sich in sechs Teile, wobei die ersten vier Teile unterschiedliche Räume betreffen (Mayer 2008):

1. Oberirdische Umwelt,
2. Oberirdische Industrie- und Nuklearanlagen,
3. Unterirdische Anlagen und geologische Umgebung,
4. Anlagen zur Zwischenlagerung.
5. Forschung und Entwicklung:
 - a) Sensoren,

- b) Datenübertragung,
- c) Energiequellen,
- d) Überwachungsstrategien,
- e) Signaldiagnostik,
- f) Daten- und Trendanalyse,
- g) Datenmanagement.

Auf Basis der übergeordneten Ziele und des nationalen Kontextes werden detaillierte technische Überwachungsziele festgelegt (Mayer 2008). Folgende Ziele werden beispielsweise bei der Überwachung der unterirdischen Anlagen und der geologischen Umgebung verfolgt (Mayer 2008):

- Betriebssicherheit,
- Rückholbarkeit,
- Langzeitsicherheit,
- Erwartungen der Interessensvertreter.

Seit 2007 arbeitet die ANDRA an einem FuE-Vorhaben, das zum Ziel hat, Messsysteme und -mittel für die Überwachung von hoch, mittel- und schwach radioaktiven Abfällen zu entwickeln und zur Verfügung zu stellen. Gegenstand des FuE-Vorhabens ist die Messung von Parametern an nicht mehr zugänglichen Orten, wo keine Instandhaltung, Kalibrierung oder Austausch defekter Messinstrumente möglich ist. Aufbauend auf erprobter Messtechnik sollen langlebige, unter Endlagerbedingungen robuste und zuverlässige Messsysteme entwickelt werden. Zusätzlich wird untersucht, wie das Altern von Messinstrumenten im Versuch beschleunigt werden kann, um die Langzeitverlässlichkeit von Sensoren, Anschlüssen und der Übertragung zu beobachten. Die ANDRA nimmt außerdem am internationalen Projekt *MoDeRn* teil, das die Entwicklung und Harmonisierung von Endlagerüberwachungsstrategien vorantreiben will.

3.2.1.6 Parameter

Die Parameter, die während des verschiedenen Phasen der Endlagerung zu beobachten sind, sind solche, welche die verschiedenen Phänomene beschreiben und quantifizieren, denen sowohl die mögliche Rückholung oder auch das Aufrechterhalten des Einlagerungszustands unterliegen. Das Beobachten dieser Phänomene liefert dem Betreiber die Informationen, die notwendig sind, um die Rückholbarkeit zu gewährleisten und zur operativen Sicherheit und Langzeitsicherheit beizutragen.

Überwachung der Einlagerungskammern für Abfälle mit mittlerer Wärmeentwicklung

In diesen Kammern ist die mechanische Stabilität der Einlagerungskammer der entscheidende Faktor hinsichtlich der Rückholbarkeit. Das vorrangige Ziel ist also die Überwachung der mechanischen Stabilität der Kammern:

- durch das Gebirge induzierte Spannungen auf den Kammerausbau,
- Formänderungen,
- die Aufsättigung in der unmittelbaren Umgebung der Kammer wirkt sich auf das Spannungsfeld aus,

Ferner ist die Gasproduktion zu ermitteln. Dafür muss die Luftzusammensetzung in der Kammer, insbesondere der Wasserstoffgehalt, bekannt sein. Für das Verstehen verschiedener Prozesse im Endlager und für die eventuelle Rückholung ist die Temperatur relevant.

Einlagerungskammern für Abfälle mit hoher Wärmeentwicklung

Hier steht die Überwachung der Faktoren, die sich auf die mechanische Stabilität der Abfallbehälter und seinen Korrosionszustand auswirken im Vordergrund. Dazu zählen:

- Wärmeentwicklung in der Kammer und ihrer Umgebung,
- Entwicklung der durch das Gebirge hervorgerufenen Spannungen, die sich auf die Metallschale auswirken, und eventueller durch Spannung hervorgerufener Verformungen,
- Entwicklung der Luftzusammensetzung in der Kammer (insbesondere des Sauerstoffgehalts) und der Luftfeuchtigkeit,
- Entwicklung des Sättigungsniveaus in der nahen Umgebung der Kammer.

Schächte und Strecken

In Strecken oder Schächten ist vor allem die mechanische Standsicherheit sicherzustellen, daher sind entsprechende Parameter zu messen. Diese Parameter hängen von der initialen Entlastung des Wirtsgesteins, von der Entwicklung des Sättigungszustands im Nahfeld und von der auf den Hohlraum wirkenden Gebirgsspannung bzw. der dadurch hervorgerufenen Deformation ab. Von besonderem Interesse sind die Abschnitte, in denen Abdichtungen gebaut werden. Dort ist die Ausbildung der Auflockerungszone nach der Auffahrung und ihre Entwicklung zu beobachten.

3.2.2 Schweiz

3.2.2.1 Endlagerprogramm

Die Endlagerung wird in der Schweiz durch das Kernenergiegesetz geregelt. Danach sind die Produzenten radioaktiver Abfälle, also die Betreiber der Kernkraftwerke, zuständig für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Sie haben daher im Jahr 1972 gemeinsam mit der Schweizerischen Eidgenossenschaft die NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) gegründet und ihr den Auftrag erteilt, die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die langfristig sichere Entsorgung der Abfälle zu erarbeiten. Die NAGRA wird vom Bund beaufsichtigt. Im Jahr 1999 setzte der Umweltminister die Expertengruppe *Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle* (EKRA) ein mit dem Auftrag, Entsorgungsoptionen zu bewerten und Grundlagen zu erarbeiten. Die EKRA entwickelte das Konzept der *kontrollierten geologischen Langzeitlagerung*, das die Einlagerung mit der Möglichkeit der Rückholbarkeit verbindet und eine intensive Überwachung des Endlagers

vorsieht, um ungünstige Entwicklungen frühzeitig zu erkennen. Das Endziel – die passive geologische Endlagerung – wird stufenweise realisiert. Nach der Einlagerung der Abfälle sieht das Konzept bis zur Schließung eine längere Beobachtungsphase vor. In einem Teil des Endlagers ist ein Pilotlager vorgesehen, das der Langzeitüberwachung dient. In dem Pilotlager können Messungen durchgeführt werden, die im eigentlichen Endlager aufgrund der möglichen negativen Auswirkungen auf die Integrität der Barrieren bzw. die Langzeitsicherheit oder aufgrund der Unzugänglichkeit nicht zulässig sind. Die Überwachung, Kontrolle und Instandhaltung des Endlagers kann sich über mehrere Generationen erstrecken. Das EKRA-Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung wurde in das Kernenergiegesetz KEG vom 21. März 2003 als geologische Tiefenlager aufgenommen.

In der Schweiz wird das Endlager für hoch radioaktive Abfälle erst Mitte dieses Jahrhunderts benötigt. Die Abfälle werden zum Abkühlen mindestens 40 Jahre lang an der Tagesoberfläche zwischengelagert.

Im Jahr 1980 wurde ein regionales geologisches Untersuchungsprogramm in der Nordschweiz zur Standortfindung für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle aufgenommen. Das breit angelegte Untersuchungsprogramm beinhaltete regionale seismische Messungen, hydrogeologische Untersuchungen, tektonische Analysen und Tiefbohrungen an verschiedenen Standorten. Neben eigenen Untersuchungen wurden auch bereits erhobene Messdaten gesammelt.

1985 reichte die NAGRA das Projekt „Gewähr“ bei den Bundesbehörden ein, das eine Machbarkeitsstudie und einen Sicherheitsnachweis der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Kristallingestein der Nordschweiz darstellt. Die Sicherheitsbehörden und Fachexperten akzeptierten die Machbarkeitsstudie nicht als Standorteignungsnachweis, woraufhin die Regierung weitere Untersuchungen anordnete und diese auf Sedimentgesteine ausdehnte. Nach Bewertung der verschiedenen Wirtsgesteine kam die NAGRA im Jahr 1994 zu dem Schluss, die weiteren geologischen Untersuchungen auf das Gestein Opalinuston im Zürcher Weinland zu konzentrieren, das nach Einschätzung der NAGRA die beste Option für die Endlagerung darstellt. Die Ergebnisse einer Tiefbohrung bei Benken und seismische Messungen in der Region bildeten die Grundlage für eine neue Machbarkeitsstudie, die den Behörden im Dezember 2002 als Entsorgungsnachweis für die Fortsetzung des Betriebes der Schweizer Kernkraftwerke vorgelegt wurde. Diese Studie wird derzeit geprüft und für Anfang 2006 wird die Resonanz der Regierung dazu erwartet.

Mit der Machbarkeitsstudie für Benken wurde keine Vorentscheidung zur Standortauswahl für ein zukünftiges Endlager getroffen. Die Standortauswahl wird in einem neuen Verfahren nach sicherheitstechnischen und geologischen Kriterien getroffen, das in der Festlegung zweier Standorte mündet, die untertägig untersucht werden sollen. Als potenziell geeignete Standortregionen gelten Jurasüdfuss-Bözberg, Nördlich Lägern und Zürcher Weinland. Die untertägige Erkundung der zu untersuchenden Standorte wird nicht vor 2020 beginnen. Das Ziel ist, im Jahr 2040 ein Lager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb zu nehmen.

3.2.2.2 Gesetzlicher Rahmen für die Endlagerüberwachung

Das Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 enthält die wesentlichen Regulierungen hinsichtlich der Endlagerüberwachung. Es fordert, dass die Langzeitsicherheit des Einlagers unabhängig von Kontrollen gewährleistet ist. Nichtsdestotrotz ist eine Überwachung in der Betriebsphase sowie eine ausgedehnte Beobachtungsphase vor der Schließung vorgesehen, die in gewissem Maße nach der Schließung fortgesetzt werden kann, wenn die Gesellschaft davon profitiert. Eine Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit durch die Messungen muss dabei ausgeschlossen werden.

Das KEG sieht vor, dass die Maßnahmen für eine Überwachung der Umgebung in der Betriebsgenehmigung für ein Endlager festgelegt werden. Nach der Einlagerung ist der Eigentümer verpflichtet, ein aktualisiertes Projekt für die Beobachtungsphase und für die Schließung vorzulegen. Nach ordnungsgemäßigem Verschluss kann der Bundesrat eine weitere befristete Überwachung anordnen. Nach ordnungsgemäßigem Verschluss oder nach Ablauf der Überwachungsfrist stellt der Bundesrat fest, dass das Lager nicht mehr der Kernenergiegesetzgebung untersteht. Der Bund kann weiter gehende Maßnahmen nach diesem Zeitpunkt, insbesondere eine Umweltüberwachung, durchführen.

3.2.2.3 Ziele der Endlagerüberwachung

Die NAGRA hat unter Berücksichtigung der internationalen Diskussion sowie des EKRA-Berichts folgende Ziele der Endlagerüberwachung formuliert (Hugi et al. 2001):

Vor der Schließung des Endlagers:

- Ergänzung der bei der Standorterkundung gewonnenen Daten durch regelmäßige oder kontinuierliche Messungen
 - als Grundlage für die Planung und Errichtung des Endlagers und für den Nachweis der Langzeitsicherheit
 - um konzeptionelle und numerische Modelle des Systemverhaltens zu bestätigen,
- Sammeln von Daten (vor der Schließung des Endlagers) um die radiologische und nicht-radiologische Einwirkung auf das Personal, die Bevölkerung und die Umwelt zu bewerten und um die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte bzw. Vorgaben zu bestätigen,
- Bereitstellung von Informationen für Entscheidungen im stufenweisen Endlagerprogramm, die auf die Schließung des Endlagers hinführen,

Vor sowie nach der Schließung:

- Safeguards: Sicherstellen, dass kein spaltbares Material entwendet wird,
- Aufrechterhalten des Vertrauens der zukünftigen Generationen in die Langzeitsicherheit des Endlagers indem die Messdaten aufzeigen, dass das Systemverhalten richtig

eingeschätzt wurde und der Sicherheitsnachweis damit auf einer adäquaten Basis steht.

Während der Einlagerung der Abfälle ist die Überwachung für die betriebliche Sicherheit erforderlich.

Außerdem ist die Endlagerüberwachung erforderlich, um den Referenzzustand festzulegen, der die Beschreibung der natürlichen Variabilität der Messparameter beinhaltet, gegen den die radiologischen und nicht-radiologischen Auswirkungen des Endlagers auf die Umwelt unter Tage und an der Oberfläche bewertet werden können.

Die Endlagerüberwachung geht jedoch über die formulierten Ziele hinaus, denn sie beinhaltet auch ein wissenschaftliches Programm, mit dem die für das Endlager relevante Entwicklung in Wissenschaft und Technologie verfolgt werden soll. Das wissenschaftliche Programm kann Laborversuche und In-situ-Tests in Untertagelabors beinhalten und berücksichtigt die wissenschaftlichen Ergebnisse und Entwicklungen in anderen Ländern. Sämtliche verfügbaren Informationen sollen in regelmäßigen Abständen zusammengetragen und zu Sicherheitsanalysen verarbeitet werden.

3.2.2.4 Strategie

Die Endlagerüberwachung ist ein wichtiger Aspekt bei der Realisierung des Endlagerprogramms und ist sowohl Teil des wissenschaftlichen Programms als auch des gesetzlichen und gesellschaftlichen Rahmens eines Endlagerprogramms. Die Endlagerüberwachung ist an die Phasen des Endlagerprogramms gebunden und ändert sich entsprechend mit Fortschreiten des Endlagerprogramms.

Die Endlagerüberwachung wird als nur ein Teil der Überwachungsstrategie gesehen, die aus der Endlagerüberwachung (also einem Messprogramm), einem auf sinnvollen Kriterien basierten Entscheidungsprozess sowie aus geeigneten Maßnahmen und Aktionen besteht (Abbildung 3-1). Im Falle eines unerwarteten und nicht akzeptablen Systemverhaltens wird mit Hilfe des formulierten Entscheidungsprozesses eine geeignete technische oder administrative Maßnahme ergriffen. Die Maßnahme im Extremfall ist die Rückholung der Abfälle.

Die Endlagerüberwachung kann jedoch den Sicherheitsnachweis nicht ablösen oder ersetzen und darf nicht die Langzeitsicherheit beeinträchtigen. Bei der Planung der Endlagerüberwachung sind die Vorteile gegen die nachteiligen Auswirkungen der Messung abzuwägen. Die betrachteten Nachteile stimmen mit den von der IAEA (2001) formulierten Nachteilen überein (siehe Kapitel 2.1), zusätzlich führt die NAGRA die Gefahr von störendem oder fremdem Material im Einlagerungsbereich an.

Nach der Schließung des Endlagers wird jegliche Überwachung wahrscheinlich von der Oberfläche aus durchgeführt, um die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht zu beeinträchtigen und wird so lange fortgesetzt, wie die Gesellschaft davon profitiert. Diese

Zeitdauer wird jedoch als kurz eingeschätzt, im Vergleich zu der Zeit, in der vom eingelagerten Abfall eine Gefahr ausgeht.

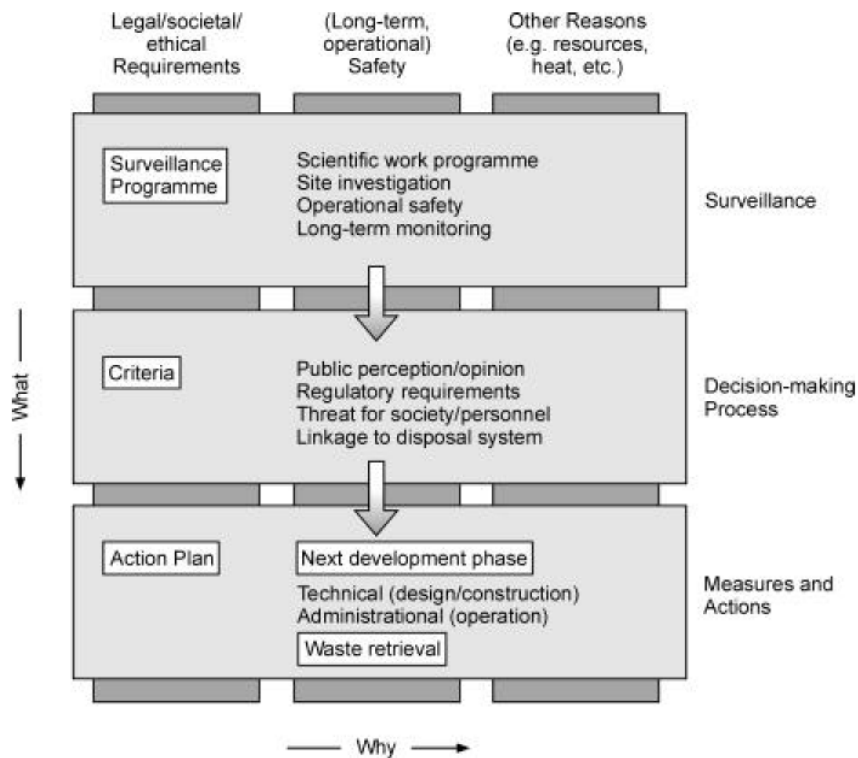


Abbildung 3-1: Strategie für die Endlagerüberwachung in der Schweiz (Hugi et al. 2001)

3.2.2.5 Bisherige Erfahrung

Die bisherige Erfahrung bei der Endlagerüberwachung beschränkt sich auf die Phase der Endlagererkundung und stammt aus folgenden Kampagnen:

- Untersuchung des kristallinen Grundgebirges in der Nordschweiz,
- Erkundung des Opalinustons im Zürcher Weinland mit einem umfangreichen seismischen Messprogramm und einer Sondierbohrung am Standort Benken,
- Forschung in den Felslabors Grimsel und Mont Terri.

3.3 Kristallin

3.3.1 Finnland

3.3.1.1 Das finnische Endlagerprogramm

Nach einer übertägigen Erkundung an mehreren Standorten hat die in Finnland für die Endlagerung zuständige Organisation Posiva Oy im Jahr 1999 einen Standort auf der Halbinsel Olkiluoto als Endlager für ausgediente Brennelemente vorgeschlagen. In Olkiluoto befinden sich bereits mehrere nukleare Anlagen (Kernreaktoren, ein Endlager für mittel- und wenig Wärme entwickelnde Abfälle), deshalb waren auch sozioökonomische Aspekte entscheidend für die Standortauswahl. Die betroffene Gemeinde Eurajoki gab im Jahr 1999 ihre Zustimmung zum Endlagerstandort. Das finnische Parlament hat im Jahr 2001 Olkiluoto als Endlagerstandort bestätigt und im Dezember 2001 ein Erkundungsprogramm beschlossen, das die Errichtung des Untertagelabors ONKALO als Teil der notwendigen Standorterkundung vorsieht. ONKALO dient der Erkundung des Wirtsgesteins, der Auswahl des für die Einlagerung geeigneten Gesteinsbereichs und dem standortspezifischen Testen der Endlagerungstechnologie. Es ist geplant, das eigentliche Endlager vom Untertagelabor ONKALO aus zu errichten. Die Abteufung der Schächte begann im Jahr 2004 und die Auffahrung der Strecken für das Untertagelabor wird bis zum Jahr 2011 andauern. Die Einlagerungskammern sind in einer Tiefe von 420 m geplant. Dieses Niveau wird einer intensiven Untersuchung der felsmechanischen Bedingungen unterzogen. Der Beginn der Errichtung des Endlagers, also der Auffahrung der Einlagerungsstrecken, ist für 2012 geplant.

Das finnische Endlagerkonzept geht von Granit als Wirtsgestein aus. Da Granit nur ein begrenztes Einschlussvermögen besitzt, kommt hier langlebigen technischen Barrieren, insbesondere dem Endlagerbehälter für die ausgedienten Brennelemente und der Bentonit-einbettung, eine große Bedeutung zu. Das Konzept sieht die Rückholbarkeit der Abfälle vor. Die Langzeitsicherheit des Endlagers wird unabhängig von einer behördlichen Kontrolle gewährleistet.

3.3.1.2 Gesetzlicher Rahmen für die Endlagerüberwachung

In Finnland gibt es keine gesetzlichen Vorgaben für die Überwachung des Endlagerstandorts vor dem eigentlichen Endlagerbetrieb. Es gibt jedoch mehrere allgemeine Gesetze bzw. Regularien, welche die Endlagerüberwachung erforderlich machen oder Vorgaben für die Umsetzung der Endlagerüberwachung enthalten:

- 1) Das Nukleargesetz besagt, dass nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle der Staat das Recht hat, alle erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen, um den radioaktiven Abfall unter Kontrolle zu halten und um die Sicherheit des Endlagers zu gewährleisten.
- 2) Den Sicherheitsanforderungen für ein Endlager (Regierungsbeschluss 1999) zufolge ist das Endlager so zu planen, dass keine Überwachung des Endlagerstandort erforderlich ist und die Methoden für die Errichtung, den Betrieb und die Schließung des

Endlagers müssen so gewählt sein, dass die Störung des Wirtsgesteins auf ein Minimum begrenzt ist.

- 3) Nach der Behörde STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority), die für die Strahlensicherheit verantwortlich ist, dürfen die Maßnahmen für die Rückholbarkeit sowie die Endlagerüberwachung nach der Schließung nicht die Langzeitsicherheit beeinträchtigen.
- 4) Das im Jahr 1994 in Kraft getretene allgemeine Gesetz für die Einschätzung von Umwelteinwirkungen (EIA) fordert, dass derjenige, der eine Einwirkung auf die Umwelt ausübt, auch ein Programm für die Überwachung dieser Einwirkung einzurichten hat.
- 5) Das Wirtschaftsministerium hat festgestellt, dass die Grundsätze für ein Überwachungsprogramm vor der Einreichung des Antrags auf die Betriebsgenehmigung für das Endlager geklärt sein müssen. Die bisherige Planung sieht die Antragsstellung für das Jahr 2012 vor.
- 6) Ein neuer Regierungsbeschluss über die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wird für das Jahr 2008 erwartet. Gemäß dem Entwurf enthält der Beschluss zwei für die Endlagerüberwachung relevante Paragraphen :

8 § Verhindern von Störungen und Unfällen

... ein Endlager muss mit einem System ausgestattet sein, dass die Störungen und Unfälle misst ...

9 § Funktion des Endlagers

... während der Betriebsphase muss ein Forschungs- und Überwachungsprogramm eingerichtet werden, um die Langzeiteffizienz der technischen Barriere zu gewährleisten..

Die Konsequenzen dieses Regierungsbeschlusses werden derzeit bei Posiva diskutiert.

3.3.1.3 Ziele der Endlagerüberwachung

Während der bereits laufenden Errichtung des Untertagelabors ONKALO werden mit dem Überwachungsprogramm folgende Ziele verfolgt:

- Beobachtung der Änderungen im Wirtsgestein, die wichtig sein könnten für die Langzeitfunktionsfähigkeit des Endlagers oder für die Bewertung des Endlagers,
- Sammeln von Informationen, die zur Vertiefung des Verständnisses über die Eigenschaften und Prozesse im Wirtsgestein und in der Umgebung beitragen,
- Sammeln von Informationen über die Auswirkungen der untertägigen Arbeiten auf das Wirtsgestein, Verwendung dieser Informationen für die Planung der weiteren Aktivitäten bezüglich der Errichtung bzw. des Betriebs des Endlagers sowie für die Planung der Stilllegung des Endlagers,
- Sammeln von Daten, die für den Vergleich mit den vorhergesagten Auswirkungen des Endlagers herangezogen werden können,

- rechtszeitige Erfassung potenzieller Probleme hinsichtlich der Betriebs- und der Stand-sicherheit im Endlager.

In der Betriebsphase schließt das Überwachungsprogramm die Betriebssicherheit ein. Von der Betriebsphase an wird die Überwachung der Wirksamkeit des Systems der technischen Barrieren berücksichtigt werden.

3.3.1.4 Strategie

Laut Okko & Rautjärvi (2006) wird das Endlager während der Errichtung, des Betriebs und wahrscheinlich auch in der Nachbetriebsphase überwacht, um zu bestätigen, dass das Endlager sicher betrieben wird und die radioaktiven Abfälle effektiv von der Biosphäre isoliert sind. Ferner soll durch die Überwachung ausgeschlossen werden, dass das eingelagerte spaltbare Material entwendet und für Nuklearwaffen genutzt wird (Safeguards). Ob die Überwachung während der Betriebsphase des Endlagers auch auf die technische Barriere und den Abfall selbst ausgedehnt wird, muss noch entschieden werden. Die Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase soll von den nachfolgenden aktuellen Generationen gestaltet werden und wird von den sozialen Rahmenbedingungen und der technologischen Entwicklung abhängen. Die Überwachung bestimmter Parameter für die Safeguards wird in der Nachbetriebsphase fortgesetzt.

Es ist geplant, das Endlagerüberwachungsprogramm vor der Inbetriebnahme des Endlagers mit dem Antrag auf die Betriebsgenehmigung im Jahr 2012 vorzulegen. Der Ausgangspunkt für die Planung des Überwachungsprogramms ist der gesetzliche Rahmen und das Olkiluoto-Überwachungsprogramm (OMO), das in bestimmten Kategorien bereits umfassend ist und in anderen Kategorien noch vertieft werden muss:

- die Überwachung der Umwelt und der Eigenschaften des Wirtsgesteins ist im OMO-Programm bereits enthalten, gegenwärtige Forschungsaktivitäten betreffen Messungen in Bohrlöchern und in den bereits aufgefahrenen Hohlräumen,
- Überwachung der Störung des Endlagers und Arbeitssicherheit (leicht umzusetzen, benötigt jedoch Planung),
- Überwachung der Wirksamkeit des Systems der technischen Barrieren (die Planung bedarf einer besonderen Aufmerksamkeit / bisher ist unsicher ob die gängige Messtechnik für diesen Zweck geeignet ist, sehr wahrscheinlich ist Forschung und Entwicklung hinsichtlich der geeigneten Technologie erforderlich). Es ist zu klären, wie die Wirksamkeit der technischen Barrieren bestätigt werden kann, welche Kriterien können hierfür herangezogen werden? In diesem Kontext wird die Überwachung eines abgeschlossenen Endlagerbereichs in Betracht gezogen.

3.3.1.5 Das Olkiluoto-Überwachungsprogramm

Olkiluoto ist als Standort des Kernkraftwerks Olkiluoto und eines Endlagers für leicht- und mittelradioaktive Abfälle in den letzten 15 Jahren von der Oberfläche aus intensiv erkundet worden. Beispielsweise begann die geologische Erkundung in den 80er Jahren und sie beinhaltete das Niederbringen von 20 gekernten Bohrungen. Diese Daten wurden bereits für die Standortauswahl verwendet und in diesem Zusammenhang veröffentlicht.

Nach dem Beschluss ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Olkiluoto einzurichten, wurde zunächst eine übertägige Standorterkundung durchgeführt, für die flache und tiefe Bohrungen niedergebracht wurden. In Posiva (2003b) sind die Ergebnisse der Standorterkundung sowie prinzipielle Überlegungen zur Endlagerüberwachung dargestellt. Die bei der übertägigen Standorterkundung erhobenen Daten sowie die verfügbaren älteren Erkundungsdaten wurden für die Festlegung der Schachtansatzpunkte und für die Beschreibung des Referenzzustands herangezogen.

Für die Überwachung während der Errichtung und des Betriebs des Untertagelabors ONKALO wurde das „**Olkiluoto Monitoring Programme**“ (**OMO**) ins Leben gerufen, das in Posiva (2003a) ausführlich beschrieben wird. Das Olkiluoto-Überwachungsprogramm begann im Jahr 2004, ein Jahr vor dem Beginn der Schachtabteufung für das Untertagelabor ONKALO. Ziel der Überwachung ist die durch die Errichtung und den Betrieb des Untertagelabors hervorgerufenen Änderungen gegenüber dem Ausgangszustand zu erfassen. Die Überwachung erfolgt von der Oberfläche aus genauso wie Untertage. Die Messergebnisse werden die Grundlage für die Planung und Durchführung der nachfolgenden Phasen der Endlagerung erweitern, somit wird das Überwachungsprogramm als Wissenserweiterung begriffen. Die Messinstrumente sind in vielen Fällen dieselben, die für die Standorterkundung verwendet wurden. Die Überwachung umfasst die Bereiche Felsmechanik, Hydrogeologie und Hydrologie, Hydrogeochemie, Umwelt und Fremdmaterialien. Die Ergebnisse der Überwachung werden jährlich in den „**Posiva Working Reports**“ veröffentlicht.

Die mit der Standorterkundung begonnene Überwachung und die Forschungsaktivitäten im Untertagelabor dienen der Charakterisierung des geologischen Untergrundes. Mit der Charakterisierung werden zwei Ziele verfolgt: erstens soll sie Informationen für die Errichtung (technische Auslegung) des Untertagelabors ONKALO liefern, zweitens werden Detailinformationen über die Mächtigkeit und die laterale Ausbreitung des Wirtsgesteins in der Umgebung von ONKALO erwartet. Zu diesen Erkundungen von der Oberfläche aus werden weitere Bohrungen und Erkundungen an der Oberfläche und Untertage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Posiva (2003c) zusammengetragen. Die Charakterisierung des Untergrundes soll letztlich die Eignung des Standorts für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen bestätigen.

3.3.1.6 Safeguards

Bei den Safeguards geht es darum auszuschließen, dass spaltbares Material aus dem Endlager entfernt und einer unzulässigen Nutzung zugeführt wird. In Finnland wurde zwischen

2002 und 2003 der nationale Safeguard-Ansatz entwickelt, der im Jahr 2003, also ein Jahr vor dem Beginn der Errichtung des Untertagelabors ONKALO, wirksam wurde. Danach ist vorgesehen, während der Errichtungsphase das Volumen der aufgefahrenen Hohlräume und das entsprechende Haufwerksvolumen zu überwachen, um sicherzustellen, dass das Haufwerksvolumen mit den aufgefahrenen Hohlräumen korrespondiert und keine zusätzlichen unbekannt Hohlräume aufgefahren wurden. Damit sollen nicht angezeigte sicherheitsrelevante Aktivitäten innerhalb oder in der Nähe des Endlagers ausgeschlossen werden. Während der Errichtungsphase fertigt die Betreibergesellschaft Posiva im Rahmen der Safeguards eine umfassende Dokumentation an und ermöglicht Inspektionen in den Strecken und Hohlräumen. Die für die Standortcharakterisierung erhobenen Daten werden als Referenzzustand auch für die Safeguards verwendet. Tabelle 3-3 enthält die hinsichtlich der Safeguards relevanten Parameter und Methoden.

Tabelle 3-3: Safeguards-Überwachungsprogramm in Finnland

Parameter	Methode	Anmerkungen
Markscheiderischer Plan der Grubenbaue	<ul style="list-style-type: none"> - Konventionelle Vermessung der Grubenbaue - Laserscan der Hohlräume -> 3D-Darstellung der Grubenbaue - Visuelle Beobachtung - Photographie - Ortsbegehung 	<p>Der markscheiderische Plan des Grubenbaus muss aufgenommen und dokumentiert werden. Die Abmessungen sind in sinnvollen Zeiträumen neu aufzunehmen, um die Änderungen aufgrund von natürlichen Setzungen bzw. Verschiebungen zu erfassen. Die Dokumentation muss bei Ortsbegehungen überprüft und verifiziert werden, so dass mögliche Abweichungen zum realen Zustand identifiziert werden können.</p> <p>In Finnland wurden im ersten Jahr der Arbeiten am Forschungsbergwerke ONKALO 14 Ortsbegehungen gemacht, davon wurden 9 aufgrund ihrer Relevanz für die Safeguards dokumentiert</p>
Haufwerksvolumen	konventionelle Vermessung	Das Haufwerksvolumen ist dem Volumen der unterirdischen Hohlräume gegenüberzustellen, um sicherzustellen, dass alle unterirdischen Hohlräume bekannt sind.
Seismische Aktivität	Seismische Messungen	Die durch die Ausschachtung und Sprengungen induzierten seismischen Ereignisse werden aufgezeichnet und auf den Ort der Quelle hin untersucht. Es werden bekannte und unbekannte Ursachen für die seismischen Ereignisse identifiziert. Das Ziel der seismischen Messungen ist sicherzustellen, dass keine nicht bewilligten Verbindungen (Zugangsstrecken, Schächte) zum Endlager errichtet werden.
An der Tagesoberfläche sichtbare Veränderungen	Satellitenbilder	<p>Auf Satellitenbildern sind die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Errichtung des Endlagers zu erkennen. Genauso können Satellitenbilder Hinweise auf unerlaubte Aktivitäten am Endlagerstandort liefern. Satellitenbilder zeigen folgendes an: Entfernung der Vegetationsdecke, Entfernung der Bodendecke, Bautätigkeit: Errichtung von Gebäuden und Straßen, mögliche Verbindungswege zum Zugangsschacht bzw. zur Zugangsstrecke, Haufwerke und Mulden.</p> <p>Aus Satellitenbildern können jedoch keine Rückschlüsse auf die Herkunft der Haufwerksmassen oder auf die Existenz der entsprechenden unterirdischen Strecken oder Hohlräume gezogen werden. Dies kann nur durch Ortsbegehungen geprüft werden.</p>

3.3.1.7 Parameter

Das OMO umfasst folgende Parameter

1. Felsmechanik
 - a. Tektonische Deformation
 - b. Seismik
 - c. Isostatische Landhebung
 - d. Verschiebung und Deformation
 - e. Spannungszustand
 - f. Auflockerungszone (Gesteinsschädigung)
 - g. Tragwerksbelastung

2. Hydrogeologie und Hydrologie
 - a. Niederschlagsvariation
 - b. Grundwasserneubildung
 - c. Abfluss
 - d. Grundwasseroberfläche
 - e. Wasserstände in oberirdischen Gewässern,
 - f. Grundwasserströmung
 - g. Flussnetz
 - h. Wasserzufluss
 - i. Wasserabfluss
 - j. Süßwasser-Salzwassergrenze

3. Geochemie
 - a. Langzeitüberwachung der Grundwasserqualität (z. B. pH, Leitfähigkeit) an offenen Bohrlöchern, flachen Bohrlöchern und Pegelrohren,
 - b. GW-Beobachtung an Bohrlöchern in Strecken,
 - c. Chemie des Wassers, das an Klüften austritt
 - d. Pumpwerke.

4. Umweltüberwachung
 - a. Luftaufnahmen
 - b. Satellitenbilder
 - c. Bodeneigenschaften
 - d. Baumbestand
 - e. Vegetation
 - f. Biomasse
 - g. Anthropogener Einfluss
 - h. Physikalische und chemische Eigenschaften des Meerwassers
 - i. Meervegetation
 - j. Phytoplankton
 - k. Meerfauna
 - l. Fischbestände
 - m. Lärm
 - n. Sickerwasser aus Abraumhalden
 - o. Private Brunnen
 - p. Vegetation in Landschaftsschutzgebieten
 - q. Landschaft

Tabelle 3-4: Im Onkalo-Überwachungsprogramm verwendete Messtechnik für die Überwachung der Gebirgsmechanik

Überwachung	Messgröße	Messtechnik
Gebirgsmechanik		
Mechanische Belastung während des Baus	Verschiebungen	Fissurometer
Seismik	Seismische Ereignisse: Größe, Ort, Zeitpunkt	Regionale Seismizität: Nationales seismisches Netz , $M_L > 1,5$
	Richterskala: M_L	Semi-regional monitoring: 3-Komponenten Geophone
	Datenübertragung von den Seismischen Stationen: Telefon bzw. Radiowellen (Funk)	Lokale Mikroseismizität, $M_L > -2$ Lokales mikroseismisches Messnetz : fünf mit Akzelerometern ausgestattete Messstationen innerhalb des Endlagers, von den 10 Messstationen in der Umgebung sind drei mit Geophonen ausgestattet Nahfeld Mikroerdbeben Bohrlochsensoren, Sensortyp G14 Aufzeichnung im Frequenzbereich von 12 bis 2000 Hz
	Lage und Stärke des Sprödbbruchs in der Nähe von aufgefahrenen Öffnungen	Messung von Schallemissionen (akustische Emissionen, AE), passives Verfahren
Tektonische Deformation	Messnetz bestehend aus seismischen und/oder GPS-Stationen und präziser Höhenmessung GPS: großskalige Bewegungen der Gebirgsmassen, Stabilität der Gebirgsmassen basierend auf Messstationen an der Oberfläche Zusätzlich zum GPS dient die präzise Höhenmessung zur Bestimmung der isostatischen Landhebungsrate	
	Regionale und lokale tektonische Deformation	Das GPS-Messnetz besteht aus zwei Komponenten: 1. Landesweite Messungen mit einem nationalen GPS-Messnetz, das vom Finnischen Geodätischen Institut (FGI) fest installiert wurde 2. Hochpräzisions-GPS-Messnetz, das vom FGI in Kooperation mit Posiva in Olkiluoto eingerichtet wurde Seit 1995 2 Messungen im Jahr, im Frühling und Herbst zur selben Zeitpunkt Messgenauigkeit der GPS-Messungen: 1 mm in horizontaler Richtung Elektrooptische Entfernungsmessung mit einem <i>Mekometer 5000</i> zwischen 2 GPS-Stationen
	VLJ-Endlager: Längenmessung zwischen vier festgelegten Punkten in einer Bruchzone, die den Zufahrtstunnel an vier Punkten in verschiedenen Höhenlagen schneidet	Konvergenzmessung, die relative Entfernungsänderung zwischen den vier Messpunkten wird mit Hilfe eines speziellen Stahlmessbands gemessen
	Schollenbewegungen	Extensometer in der Bruchzone, Konvergenzmessungen
isostatische Landhebung	Relative isostatische Landhebung	Präzisionsnivellement, alle 2 Jahre
	Regionale isostatische Landhebung	Präzisionsnivellement, alle 5 Jahre
Neben den GPS-Messungen wird zum selben Zeitpunkt wie die GPS-Messung im Frühjahr ein Präzisionsnivellement durchgeführt. Das Nivellement wird für 8 Gebirgs-anker in der Nähe von GPS-Stationen durchgeführt, die zwischen 0,5 bis 3,5 km voneinander entfernt sind. Das Präzisionsnivellement-Messnetz deckt ein Gebiet von 6 km ² ab.		Alle fünf Jahre werden die Messungen auf dem Festland nach Olkiluoto ausgedehnt, um die Hebung der Insel mit der Hebung der Ostküste zu vergleichen.

Überwachung	Messgröße	Messtechnik
Gebirgsbewegung in der Strecke	Änderung der Streckenquerschnitts	Konvergenzmessung an einigen Querschnitten in der Zufahrtsrampe und in speziellen Strecken z. B. werden spezielle Messungen in verschiedenen Richtungen abhängig von der Hauptspannungsrichtung durchgeführt, um die Streckenschleife zu charakterisieren
	Gebirgsverschiebung	Tägliche Messungen mit <u>Extensometern mit Datenloggern</u> . Messintervall wird in einigen Bereichen kleiner sein als 1 Tag, die Messorte sind noch nicht festgelegt Extensometermessungen: genauer als Konvergenzmessungen, da die relativen Verschiebungen an mehreren Punkten in verschiedenen Tiefen in einem Bohrloch gemessen werden. Auch wird mit Extensometermessungen die Verschiebungen in größeren Gebirgsbereichen beobachtet.
	Verschiebungen in Bruchzonen und Klüften	Wo die Strecke Bruchzonen, die aus gebirgsmechanischer Sicht signifikant sind, oder Einzelklüfte durchfährt, wird der Bereich mit Extensometern und/oder Crackmeter oder Konvergenzmessstiften instrumentiert, um die Verschiebung (Scher- und Normalverschiebung) aufzuzeichnen. Ein detaillierter Messplan wird während der Errichtungsphase erarbeitet, sobald eine Bruchzone bzw. Kluft durchfahren wurde.
Spannungsumverteilung		Druckmesser ausgestattet mit Datenloggern werden im Einlagerungsbereich installiert. Die Datenlogger werden zusammen mit den Extensometern ausgelesen. Bei Bedarf werden die Bruchzonenbereiche der Strecken mit Druckmessern ausgestattet.
Auflockerungszone		Visuelle Kartierung der Schädigung: Kartierung der Schädigung in der Strecke wird systematisch während der Errichtung nach jeder vierten Ausschachtungsrunde vorgenommen. Nach der Auffahrung wird das visuelle Monitoring fortgesetzt, wird jedoch auf die Inspektion der Stöße und der Firste, inklusive der möglicherweise mit Spritzbeton versehenen Bereiche, beschränkt. Was visuell nicht erkennbar ist, kann mit AE oder Mikroseismik (MS) detektiert werden. Beide Methoden können verwendet werden, um die Richtung und Größe der maximalen Druckspannung durch den Vergleich von gemessenen mit modellierten Spannungen zu validieren. Schallemissionen (AE): Messung der akustischen Wellen, die bei Bruchvorgängen in Festkörpern erzeugt werden. Die Messung erfolgt also während der Belastung. Das AE-Monitoring wurde in Äspö HRL (Schweden) und in URL (Kanada) erfolgreich angewendet. AE-Sensoren werden an wenigen Standorten im Einlagerungsbereich und in der Eingangsstrecke installiert, um Hintergrunddaten zu erhalten. MS wird erfolgreich im Bergbau angewendet.
Tragwerksbelastung		Die Messung wird an den selben Querschnitten durchgeführt, an denen Extensometer-Messungen durchgeführt werden.
Temperatur		

3.3.2 Schweden

3.3.2.1 Historie und aktueller Stand des schwedischen Endlagerprogramms

In Schweden sind die Erzeuger der radioaktiven Abfälle zuständig für die Endlagerung. Sie haben gemeinsam die SKB⁵ gegründet, die für die Implementierung eines Abfallmanagementsystems verantwortlich ist (EC 2004). Die ausgedienten Brennelemente werden in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen abgelegt. Nach der Stilllegung wird die

⁵ SKB: Svensk Kärnbränslehantering AB, engl. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Verantwortung für das Endlager auf den Staat übergehen. Die gesetzliche Grundlage für das Endlagerprogramm ist der **Act on Nuclear Activities**, der vorsieht, dass die Aktivitäten alle drei Jahre auf Grundlage eines von der SKB entwickelten Forschungs- und Entwicklungsprogramms überprüft werden. Das schwedische Programm läuft stufenweise ab, wobei an den Hauptentscheidungspunkten Zwischengenehmigungen einzuholen sind.

Seit den 70er Jahren wird in Schweden Forschung auf dem Gebiet der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen betrieben. Nach dem Aufbau einer generellen Wissensbasis über das Wirtsgestein Granit, das Tiefbohrungen und die Messung der Gesteinseigenschaften an ca. 10 Standorten in Schweden umfasste, und dem Vorantreiben der Einlagerungstechnologie wurden umfassende Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Endlagerstandorte initiiert. Im Jahr 1986 hat die SKB entschieden, das Äspö Untertagelabor zu errichten. Dieses wird für Forschung, Entwicklung und die Demonstration der Technik im Zusammenhang mit der Endlagerung genutzt.

Das Entwicklungs- und Forschungsprogramm der SKB kam im Jahr 1992 zu dem Schluss, dass eine ausreichende Wissensgrundlage besteht, um die Standortsuche zu beginnen. Die zuständigen Behörden und die Regierung bestätigten diese Erkenntnis. Entsprechend wurde in den 90er Jahren die Standortsuche intensiviert, wobei die lokalen Behörden und die Öffentlichkeit in die Debatte mit einbezogen wurden. In acht Gemeinden wurden basierend auf verfügbaren Daten umfangreiche Machbarkeitsstudien erstellt, mit dem Ergebnis, dass in fünf der acht Gemeinden die geologische Eignung für die Endlagerung gegeben ist. Aufgrund ihrer besonderen Eignung hat die SKB drei Standorte für die Standorterkundung ausgewählt – Oskarshamn, Forsmark und Tierp, die Gemeinde Tjerp hat jedoch der Standorterkundung nicht zugestimmt.

Seit 2002 werden die zwei potenziellen Endlagerstandorte Forsmark und Oskarshamn erkundet. Das Ziel der Erkundung ist, die geologische und technische Eignung der Standorte zu bewerten, die Standorte mit anderen erkundeten Standorten zu vergleichen und den Referenzzustand zu beschreiben. Zur Zeit werden die gewonnenen Ergebnisse analysiert und die Sicherheitsbewertung und Umweltverträglichkeitsprüfung werden umgesetzt. Die Entscheidung für einen Endlagerstandort (zwischen Oskarshamn und Forsmark) wird für 2009 erwartet. Vorausgesetzt, beide Standorte erfüllen die Anforderungen an die geologischen Bedingungen, werden wahrscheinlich soziologische und ökonomische Gründe die Auswahl des Standortes mitentscheiden. Im Jahr 2009 soll für einen der beiden Standorte ein Genehmigungsantrag eingereicht werden. Mit der Genehmigung des Endlagers wird im Jahr 2011, mit der Aufnahme des Endlagerbetriebs frühestens im Jahr 2020 gerechnet.

In Schweden wird das Endlager im Wirtsgestein Granit gebaut. Aufgrund von Störungen und Klüften ist das Einschlussvermögens des Granits begrenzt, weshalb der technischen Barriere bestehend aus einem langlebigen Kupferkanister⁶ mit innenliegendem Stahlbehälter und einem gering durchlässigem Bentonitpuffer und eine große Bedeutung zukommt. Die ausgehenden Brennstäbe werden in den Kupferkanistern verkapselt, die dann in mit Bentonit ausgegossene Kammern eingelagert werden. Sicherheitsrelevant ist der Nachweis, dass die

⁶ Der Kupferkanister ist aus sauerstofffreiem Kupfer und dient als Korrosionsschutz.

Schweißnähte am Kupferkanister dicht sind. Dafür existieren bereits zerstörungsfreie Messmethoden.

3.3.2.2 Gesetzlicher Rahmen

In Schweden gibt es keine speziellen Gesetze oder Vorschriften, die konkret die Endlagerüberwachung anordnen. Jedoch betreffen die gesetzlichen Regelungen zur Überwachung von größeren Industrieanlagen auch Endlager. Aus dem Umweltgesetz ergibt sich eventuell die Notwendigkeit, dass für Messungen, die bestimmte Auswirkungen auf die Umwelt haben, vorher Genehmigungen einzuholen sind.

In den Sicherheitsvorschriften für Endlager ist vorgeschrieben, dass die Auswirkungen folgender Maßnahmen auf den Sicherheitsnachweis analysiert und dem SKI⁷ darüber Bericht erstattet werden soll (SKI 2002):

- die in einem Endlager eingesetzte Messtechnik zur Endlagerüberwachung,
- Gewährleistung der Rückholbarkeit der Abfälle,
- Erschweren des Zugangs zum Endlager.

In den Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften heißt es, dass diese Maßnahmen nur einen geringen oder vernachlässigbaren Einfluss auf die Endlagersicherheit haben dürfen bzw. dass die Maßnahmen zu einer Erhöhung der Sicherheit führen müssen, gegenüber dem Zustand ohne diese Maßnahmen (SKI 2002).

In den Sicherheitsvorschriften für alle Arten von nuklearen Anlagen, zu denen auch Endlager gehören, wird die Endlagerüberwachung in folgendem Zusammenhang erwähnt (SKI 2004):

- der radiologischen Endlagerüberwachung wird eine wesentliche Bedeutung für den Fall zugesprochen, dass der Austritt von radioaktiven Substanzen nicht verhindert werden konnte, durch entsprechende Messkontrollen und vorbereitete Maßnahmen sollen radioaktive Substanzen detektiert und die Auswirkungen abgeschwächt werden (Kapitel 2, § 1),
- die Endlagerüberwachung ist auf eine Art und Weise durchzuführen, dass der normale Endlagerbetrieb nicht gestört ist und Unfällen vorgebeugt wird,
- der „safety report“ muss u. a. eine Beschreibung der sicherheitsrelevanten Messsysteme enthalten,

⁷ Das **Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI)** sowie die **Swedish Radiation Protection Agency (SSI)** sind die wichtigsten für die Sicherheit von nuklearen Anlagen und für den Strahlenschutz zuständigen Behörden.

- die Überwachung von des Verhaltens von Komponenten des Endlagers während des Betriebs stellt die Grundlage für die Analyse ihrer Verlässlichkeit und damit für die Einschätzung der Sicherheit und Qualität dar,
- Sicherheitsindikatoren können eine geeignete Hilfe bei Überwachung der nuklearen Aktivität sein,
- das Programm für den Umgang mit der Alterung und Zerstörung von Endlagerkomponenten sollte eine Überwachung der Alterungsmechanismen, die Strukturen, Systeme und Komponenten schädigen können, beinhalten.

3.3.2.3 Ziele der Endlagerüberwachung

In Bäckblom & Almén (2004) wird eine Vorgehensweise für die Planung eines Überwachungsprogramms vorgeschlagen. Darin werden folgende Ziele der Endlagerüberwachung genannt:

- Beschreiben des Referenzzustands,
- Verstehen des natürlichen Systems und des Verhaltens der technischen Barrieren,
- Erzeugen der Grundlage für Entscheidungen,
- Zeigen der Einhaltung nationaler und internationaler Richtlinien und Vorschriften.

Spezielle Gründe für die Endlagerüberwachung sind:

- Wissen über die ungestörten Bedingungen und ihre jahreszeitlichen Schwankungen zu sammeln (Referenzzustand), um die Auswirkungen des Aktivitäten im den verschiedenen Phasen des Endlagerprogramms bewerten zu können,
- Verstehen der Funktionsweise des Endlagersystems, um den Sicherheitsnachweis zu unterstützen und die Modelle und Annahme zu testen,
- Überwachung der Auswirkungen des Endlagers auf die Umwelt,
- Sicherstellen der radiologischen und nicht-radiologischen betrieblichen Sicherheit,
- Erfüllen der Safeguards-Anforderungen.

Die genannten Ziele und Gründe werden als Ausgangspunkt für die Festlegung detaillierter Überwachungsziele betrachtet, die im Rahmen der Planung der Endlagerüberwachung erfolgen soll. Es ist vorgesehen, dass die Überwachungsziele regelmäßig überprüft und aktualisiert werden.

3.3.2.4 Überwachungsstrategie

Die Überwachungsstrategie beinhaltet eine enge Kopplung der Überwachung an das Endlagerprogramm. Danach ist die Endlagerüberwachung keine eigenständige Maßnahme, sondern sie ist integriert in die Standorterkundung und die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers (EC 2004). Die Endlagerüberwachung muss mit dem gesetzlichen Rahmen übereinstimmen, deshalb müssen das Messsystem und seine Instandhaltung auf ihre Sicherheitsauswirkungen hin bewertet werden. Die Überwachungsstrategie umfasst (Bäckblom & Almén, 2004):

- die Ziele der Endlagerüberwachung,
- Umfang der Endlagerüberwachung:
Die Parameter, die gemessen werden sollen, sind solche, die die Ziele der Endlagerüberwachung betreffen. Sie dürfen die betriebliche Sicherheit und die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen. Die Messparameter sollten indirekt oder direkt messbar sein und sollten nützliche Informationen, die verlässlich und nachvollziehbar sind, liefern. Beispielsweise gehören folgende Messparameter zum Messumfang:
 - Rand- und Anfangsbedingungen, die für die Aktualisierung des Sicherheitsnachweises erforderlich sind,
 - Modellparameter oder Daten für die Kalibrierung der Modelle,
 - Umweltparameter, deren Überwachung gemäß der Genehmigungsvorgaben zu überwachen sind,
 - Stabilität des Grubenbaus,
- Identifizierung der Eigenschaften, Prozesse und der Größen, die überwacht werden sollen,
- Identifizierung der Methoden, die angewendet werden sollen,
- Betreiben des Überwachungsprogramms:
 - Dauer und Häufigkeit der Messung, inklusive der Kriterien dafür, ob die Überwachung eingestellt werden soll,
 - Qualitätssicherung und dem Berichten über die Messergebnisse,
 - Entscheidung über Auslöser-Schwellenwerte für Maßnahmen oder Aktionen, Die Überschreitung eines **trigger levels** muss nicht unbedingt einen Alarm auslösen, sondern gibt eher Anlass für eine Untersuchung, Modellrevidierung oder Planänderung.

3.3.2.5 Messparameter

Die nachfolgende Tabelle zeigt die typischen Messparameter, die in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms gemessen werden könnten.

Tabelle 3-5: Mögliche Messparameter in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms (aus Bäckblom & Almén (2004))

Standorterkundung	Errichtung und detaillierte Charakterisierung	Inbetriebnahme, Betrieb und Schließung	Nachbetrieb
Umweltüberwachung - Störung der übertägigen Erkundung	Umweltüberwachung - Störung der übertägigen Erkundung - Auswirkung der Endlagererrichtung (Boden, Grundwasser, Gas, Lärm)	Umweltüberwachung - Störung der übertägigen Erkundung - Auswirkung der Endlagererrichtung (Boden, Grundwasser, Gas, Lärm)	Umweltüberwachung - Einfluss des Anstiegs des Grundwasserstandes Die Dokumentation wird aufbewahrt.
Klima - Temperatur, Luftdruck, Niederschlag, Evaporation, Abfluss, Meeresspiegel	Klima - Temperatur, Luftdruck, Niederschlag, Evaporation, Abfluss, Meeresspiegel	Klima - Temperatur, Luftdruck, Niederschlag, Evaporation, Abfluss, Meeresspiegel	Klima - Temperatur, Luftdruck, Niederschlag, Evaporation, Abfluss, Meeresspiegel
Biosphäre - Flora, Fauna, Bodenschichten, Landnutzung, usw.	Biosphäre - Flora, Fauna, Bodenschichten, Landnutzung, usw.	Biosphäre - Flora, Fauna, Bodenschichten, Landnutzung, usw.	Biosphäre - Flora, Fauna, Bodenschichten, Landnutzung, usw. Die Dokumentation wird aufbewahrt.
Übertägige Bohrungen - Grundwasserchemie, -druck, und Temperatur	Übertägige Bohrungen - Grundwasserchemie, -druck, und Temperatur	Übertägige Bohrungen - Grundwasserchemie, -druck, und Temperatur	Die Dokumentation wird aufbewahrt.
	Untertägige Bohrungen - Grundwasserchemie, -druck, und Temperatur, - Verformungen der Gesteine	Untertägige Bohrungen - Grundwasserchemie, -druck, und Temperatur, - Verformungen der Gesteine	Die Dokumentation wird aufbewahrt.
Seismische Ereignisse - Zeit, Ort und Art des lokalen Erdbebens	Seismische Ereignisse - Zeit, Ort und Art des lokalen Erdbebens - mikroseismische Ereignisse	Seismische Ereignisse - Zeit, Ort und Art des lokalen Erdbebens - mikroseismische Ereignisse	Seismische Ereignisse - Zeit, Ort und Art des lokalen Erdbebens - mikroseismische Ereignisse
	Endlagerüberwachung - Feuer, Wassereinbrüche, Sickerwasser, herausgepumptes Wasser (Menge, Qualität), - Bewetterung (Temperatur, Menge, Qualität), - Lärm, - Bedingungen für die vorsorgende Instandhaltung, - Stabilität der Hohlräume.	Endlagerüberwachung - Feuer, Wassereinbrüche, Sickerwasser, herausgepumptes Wasser (Menge, Qualität), - Bewetterung (Temperatur, Menge, Qualität), - Lärm, - Bedingungen für die vorsorgende Instandhaltung, - Stabilität der Hohlräume, - radiologische Überwachung, - Sicherheitsvorkehrungen (Safeguards).	Endlagerüberwachung - Sicherheitsvorkehrungen (Safeguards). Die Dokumentation wird aufbewahrt.

3.3.2.6 Standorterkundung

Bevor die Standorterkundung in Forsmark und Oskarshamn begonnen wurde, hat die SKB ein Standortuntersuchungsprogramm entwickelt, das als ein *geowissenschaftliches Programm für die Untersuchung und Bewertung von Standorten* aufgefasst wird. Dieses Programm beschreibt ausführlich, welche Daten zu sammeln sind und wie diese Daten in die Bewertung des Standortes eingehen. Die Standorterkundung wird in zwei Phasen eingeteilt:

die Ersterkundung (initial site investigation, ISI)) und die Gesamterkundung (complete site investigation, CSI)). Die Ersterkundung zielt darauf ab, innerhalb des Untersuchungsgebiets eine 5 – 10 km² große Fläche auszumachen, die die beste Eignung als Endlagerstandort hat und die für diese Fläche im Rahmen der vorausgegangenen Machbarkeitsstudie (feasibility study (FS)) vorgenommene erste Bewertung anhand genauerer Daten zu bestätigen. In der Gesamterkundung werden alle Daten erhoben, die für die Standortauswahl und für den Antrag auf die Genehmigung des Endlagers erforderlich sind. Die Kenntnis über das Gestein und seine Eigenschaften muss dahingehend vertieft werden, dass ein Entwurf für die Grube sowie eine Machbarkeits- und Sicherheitsanalyse erstellt werden können. Die Gesamterkundung beinhaltet 3 – 4 Tiefbohrungen. Die detaillierte Beschreibung (detailed characterization (DC)) erfolgt nach der Genehmigung des Endlagers.

Das Standorterkundungsprogramm wird in sieben Disziplinen gegliedert:

- Oberflächenökosysteme,
- Geologie,
- Hydrogeologie
- Hydrogeochemie,
- Felsmechanik,
- Thermische Eigenschaften,
- Transporteigenschaften des Gesteins.

In jeder Disziplin werden verschiedene Parametergruppen und darin mehrere zu messende Parameter unterschieden. Für jeden Messparameter wird angegeben, in welcher Phase er gemessen werden soll. Die Tabelle 3-6 zeigt beispielhaft einige Parametergruppen aus der Disziplin Geologie.

Tabelle 3-6: Auswahl an geologischen Parametergruppen und zugehörigen Parametern, die in verschiedenen Phasen der Standorterkundung zu messen sind

Parameter group	Parameter	Determined primarily during			
		FS	ISI	CSI	DC
Topography	Topography	x	x		
Soil cover	Thickness of soil cover		x	x	
	Mineral soil distribution	x	x		
	Mineral soil description		x		
	Soil		x		
	Bottom sediment		x	x	
	Indication of neotectonics		x		
Bedrock					
Rock types					
Occurring rock types	Rock type distribution (spatial and percentage)	x	x	x	x
	Xenoliths			x	x
	Dikes	x	x	x	x
	Contacts		x	x	x
	Age			x	
	Ore potential – industrial minerals	x	x		

3.4 Salzgestein

3.4.1 Deutschland

3.4.1.1 Historie und Stand des Endlagerprogramms

In Deutschland wurden bereits in den 60er und 70er Jahren mehrere wissenschaftlich begleitete Suchverfahren durchgeführt. In den 70er Jahren wurden zwei Standortauswahlverfahren im Auftrag des Bundes bzw. des Landes Niedersachsen durchgeführt. Auf dieser Grundlage benannte die niedersächsische Landesregierung am 22. Februar 1977 den Salzstock Gorleben als vorläufigen Standort für ein Endlager und für ein Nukleares Entsorgungszentrum. Am 5. Juli 1977 akzeptierte die Bundesregierung die niedersächsische Standortentscheidung und beauftragte die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), ein Planfeststellungsverfahren für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Gorleben einzuleiten.

1979 wurde die umfassende geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben zur Klärung der Eignung des Salzstockes für die Endlagerung radioaktiver Abfälle aufgenommen. Am 13. Juli 1983 stimmte die Bundesregierung der Erkundung des Salzstockes Gorleben zu, im Jahr 1996 nach Erreichen der Erkundungssohle begonnen wurde. Noch im Jahr 1996 wurde die Verbindung zwischen den Schächten errichtet und ab 2000 wurde ein 7 km langes Streckensystem aufgefahren. Am 1. Oktober 2000 wurde die Erkundung des Salzstockes Gorleben eingestellt. Die Veranlassung dafür war ein zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vereinbarter Konsens, der die Aussetzung der Erkundung für längstens 10 Jahre vorsah, um konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen zu klären.

Diese Fragen wurden in einem im November 2005 vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) vorgelegten Bericht behandelt. Es gibt jedoch bis heute keine Eignungsaussage zum Standort Gorleben. Diese ist erst mit Abschluss des atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens durch das Niedersächsische Umweltministerium als zuständige Behörde möglich. Der Abschluss des Verfahrens setzt zunächst voraus, dass die untertägige Erkundung beendet und ausgewertet und eine standortspezifische Sicherheitsanalyse durchgeführt worden ist. Aktuell steht zur Diskussion, die Standortsuche auf andere Wirtsgesteine und andere Standorte auszudehnen.

3.4.1.2 Endlagerkonzept

Das Endlagerkonzept in Deutschland sieht die Endlagerung in tiefen geologischen Schichten vor. Damit werden zwei Schutzziele verfolgt: (1) der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstiger schädlicher Wirkungen dieser Abfälle und (2) die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen. Das zweite Schutzziel wird erreicht, indem längerfristige Kontroll- oder Wartungsmaßnahmen bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen entfallen (BMU 2008).

Bisher wurden Steinsalzformationen untersucht, da Salz eine Reihe von Vorteilen bietet: es ist homogen und gering durchlässig und weist sehr geringe Wassergehalte und eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf, aufgrund seines plastischen Verhaltens und seines Kriechvermögens kann Salz die Abfälle dicht umschließen und Klüfte und Risse im Salz heilen. Das Einschlussvermögen des Salzes ist also sehr gut und der Platzbedarf für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle ist aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit gering, da die Wärme schnell abgeleitet wird. Ferner besteht in Deutschland viel Erfahrung in Salzbergbau.

Nachdem die Standorterkundung im Salzstock Gorleben ausgesetzt wurde, wird aktuell die Möglichkeit der Endlagerung in anderen Wirtsgesteinen diskutiert.

3.4.1.3 Gesetzlicher Rahmen

Es gibt viele Gesetze bzw. technische Richtlinien, die bei der Endlagerüberwachung zu beachten sind, beispielsweise:

- Kernenergiegesetz (KEG),
- Bundesberggesetz (BbergG),
- Bundesemissionsgesetz,
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG),
- Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung – GesBergV),
- Klima-Berg-Verordnung (KlimaBergV),
- Strahlenschutzverordnung (StrSchV), u. a..

Die „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktive Abfälle in einem Bergwerk vom 5.1.1983“ enthalten die wichtigsten Regelungen hinsichtlich der Standortfindung, Errichtung, Betrieb und Schließung eines Endlagers. Die zuständigen Behörden und Länder sind angehalten, im Planfeststellungsverfahren für Endlager diese Sicherheitskriterien anzuwenden. Nach diesen Kriterien sind die radioaktiven Abfälle in einem Endlager ohne Instandhaltungsbedarf sicher und auf unbefristet lange Zeit von der Biosphäre zu isolieren. Die Rückholbarkeit der Abfälle wird nicht verfolgt. Die Sicherheitskriterien umfassen Regelungen zur übertägigen und untertägigen Standorterkundung sowie zur Überwachung der Umwelt. Danach ist die Überwachung bis zur Stilllegung ein Instrument zur Gewährleistung der passiven Endlagersicherheit. Bezüglich der Überwachung der Umwelt heißt es in Artikel 10.1:

Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagerbergwerkes werden so durchgeführt und überwacht, dass in der Nachbetriebsphase ein gesondertes Kontroll- und Überwachungsprogramm entbehrlich ist.

Routinemäßig durchgeführte allgemeine Umweltschutzmessungen sowie Gelände- und Geländevermessungen geben Aufschluss über die Radiologie und das langfristige thermomechanische Verhalten der Endlagerformation, des Deckgebirges und des Nebengesteins.

Der neue Entwurf für die Sicherheitsanforderungen vom 29.7.08 enthält mehrere Richtlinien, bezüglich Endlagerüberwachung und Richtlinien, die sich indirekt auf die Endlagerüberwachung auswirken (BMU 2008):

5.4: Für die ersten 500 Jahre nach der Stilllegung des Endlagers ist zu gewährleisten, dass die Information über das Endlager zur Kenntnis der beispielsweise für Tiefbauvorhaben, den Bau von Tiefbrunnen oder für den Bergbau zuständigen Stellen gelangt und erhalten bleibt.

6.4: Während des Einlagerungsbetriebs ist vom Betreiber jeweils im Abstand von 10 Jahren eine Überprüfung auf sicherheitsrelevante Veränderungen des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Beurteilung von Endlagern und eine Überprüfung und Bestätigung der Sicherheitsnachweise durchzuführen. In Diese Überprüfung und Bestätigung ist auch der Erfahrungsrückfluss aus dem Betrieb des Endlagers einzubeziehen.

8.8: Zur Überprüfung der Sicherheitsnachweise für den Einlagerungsbetrieb, die Stilllegung und für den Zeitraum nach Stilllegung ist ein Messprogramm durchzuführen, anhand dessen die Eingangsdaten, Annahmen und Aussagen dieser Nachweise nach Möglichkeit überprüft werden. Dieses Messprogramm hat insbesondere die Auswirkungen der thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf die wärmeentwickelnden Abfälle, die geotechnischen Maßnahmen sowie die gebirgsmechanischen Vorgänge zu erfassen. Die Messungen umfassen weiterhin den Ausgangszustand und die Entwicklung der Aktivitätskonzentration in Quell- und Grundwässern, Böden, Gewässern und in der Luft im Einflussbereich des Endlagers zu Beweis Zwecken. Wesentliche Abweichungen von diesbezüglichen Daten, Aussagen und Annahmen der genannten Sicherheitsnachweise sind unverzüglich der zuständigen Behörde mitzuteilen und hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz zu bewerten. Notwendigenfalls sind vom Betreiber Gegenmaßnahmen durchzuführen, um eine Beeinträchtigung wesentlicher Sicherheitsfunktionen zu vermeiden. Soweit für diese Gegenmaßnahmen eine Genehmigung erforderlich ist, ist diese bei der zuständigen Behörde zu beantragen. Die zuständige Behörde entscheidet auch über die Beendigung des Messprogramms.

8.8: Bei der Erkundung sind vom Antragsteller die für die Sicherheit des Endlagers wesentlichen Standortdaten in einem für die Sicherheitsnachweise ausreichendem Umfang zu ermitteln. Soweit hierfür eine quantitative Ermittlung von Standortdaten erforderlich ist, ist auch die Genauigkeit oder Bandbreite sowie eine mögliche Veränderung dieser Standortdaten unter Endlagerbedingungen zu ermitteln. Der Antragsteller hat der Genehmigungsbehörde die Gültigkeit dieser Daten nachzuweisen. Soweit an anderen Standorten ermittelte Daten verwendet werden, ist die Übertragbarkeit dieser Daten zu begründen.

Quantitative Daten sind erforderlich, um aussagekräftige Sicherheitsanalysen durchführen zu können. Falls keine statistisch abgesicherten Aussagen zur Genauigkeit der Standortdaten möglich sind, können stattdessen maximal oder minimal mögliche Werte angegeben werden.

9.3 Erkundungsbohrungen und Erkundungsschächte sind so gebirgsschonend wie möglich auszuführen und so zu verschließen, dass die Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Einbeziehung der erforderlichen Sicherheitsfesten erhalten bleiben.

9.6 Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.

9.12 Die markscheiderischen Daten des Endlagers, die sicherheitstechnisch bedeutsamen Eigenschaften der Abfälle, die technischen Maßnahmen bei Errichtung, Einlagerungsbetrieb und Stilllegung des Endlagers, die Ergebnisse des Messprogramms sowie der Langzeitsicherheitsnachweis sind zu dokumentieren. Insbesondere ist darzulegen, welcher Bereich in der Umgebung des Endlagerbergwerks vor menschlichen Eingriffen in den tiefen Untergrund geschützt werden muss bzw. welche Eingriffe mit besonderen Auflagen versehen werden müssen. Vollständige Dokumentensätze sind sowohl bei den für die Zulassung von Eingriffen in den tiefen Untergrund zuständigen Behörden als auch bei einer Behörde des Bundes aufzubewahren.

Der Kerntechnische Ausschuss (KTA) stellt sicherheitstechnische Regeln auf dem Gebiet der Kerntechnik auf und fördert die Anwendung dieser Regeln. Darunter sind Regeln für die betriebliche Sicherheit, die auch während des Betriebs eines Endlagers eingesetzt werden sollten. Diese Regeln geben einen gewissen Standard vor, sind jedoch nicht verbindlich.

Das Naturschutzgesetz und das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung geben Anlass für die Überwachung bestimmter Biotope und allgemeiner Umweltauswirkungen:

Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG:

§ 2 Grundsätze des Naturschutzes und der Landschaftspflege

*(2) Bund und Länder unterstützen die internationalen Bemühungen und die Verwirklichung der Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaften auf dem Gebiet des Naturschutzes und der Landschaftspflege. Die Errichtung des Europäischen ökologischen Netzes "Natura 2000" ist zu fördern. Sein Zusammenhalt ist zu wahren und, auch durch die Pflege und Entwicklung eines Biotopverbunds, zu verbessern. Der **Erhaltungszustand der Biotope von gemeinschaftlichem Interesse**⁸, insbesondere der dem Netz "Natura 2000" angehörenden Gebiete, der Arten von gemeinschaftlichem Interesse und der europäischen Vogelarten ist zu überwachen.*

Das Atomgesetz fordert, dass nach vorläufiger Auswahl eines Standortes ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen ist, welches die Eignung des Endlagerstandorts feststellt.

Dieses Planfeststellungsverfahren beinhaltet auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung. Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) sieht die Überwachung von Umweltauswirkungen vor. Im § 14m - Überwachung – heißt es dazu:

- (1) Die erheblichen Umweltauswirkungen, die sich aus der Durchführung des Plans oder Programms ergeben, sind zu überwachen, um insbesondere frühzeitig unvorhergesehene nachteilige Auswirkungen zu ermitteln und geeignete Abhilfemaßnahmen ergreifen zu können. Die erforderlichen Überwachungsmaßnahmen sind mit der Annahme des Plans oder Programms auf der Grundlage der Angaben im Umweltbericht festzulegen.*
- (2) Soweit Rechtsvorschriften des Bundes oder der Länder keine abweichende Zuständigkeit regeln, obliegt die Überwachung der für die Strategische Umweltprüfung zuständigen Behörde.*
- (3) Andere Behörden haben der nach Absatz 2 zuständigen Behörde auf Verlangen alle Umweltinformationen zur Verfügung zu stellen, die zur Wahrnehmung der Aufgaben nach Absatz 1 erforderlich sind.*
- (4) Die Ergebnisse der Überwachung sind der Öffentlichkeit nach den Vorschriften des Bundes und der Länder über den Zugang zu Umweltinformationen sowie den in § 14h genannten Behörden zugänglich zu machen und bei einer erneuten Aufstellung oder einer Änderung des Plans oder Programms zu berücksichtigen.*

⁸ **Biotope von gemeinschaftlichem Interesse**

die in Anhang I der Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wild lebenden Tiere und Pflanzen (ABl. EG Nr. L 206 S. 7), die zuletzt durch die Richtlinie 97/62/EG vom 27. Oktober 1997 (ABl. EG Nr. L 305 S. 42) geändert worden ist, aufgeführten Lebensräume,

- (5) Zur Erfüllung der Anforderungen nach Absatz 1 können bestehende Überwachungsmechanismen, Daten- und Informationsquellen genutzt werden. § 14g Abs. 4 gilt entsprechend.

Die aus dem UVPG im Zusammenhang mit dem Endlager erforderlichen Überwachungsmaßnahmen werden in der Umweltverträglichkeitsstudie festgelegt.

3.4.1.4 Ziele der Endlagerüberwachung

Als allgemeine Ziele der Endlagerüberwachung werden von Biurrun et al. (2001) die Verbesserung der Langzeitsicherheitsbewertung, die betriebliche Sicherheit und die öffentliche Akzeptanz genannt. Die spezifischen Sicherheitsziele sind (Biurrun et al. 2001):

- betriebliche Sicherheit (radiologisch und nicht-radiologisch),
- Vertrauensbildung (das Vertrauen wird gestärkt, indem mit Hilfe der Endlagerüberwachung gezeigt wird, dass das Endlager sich erwartungsgemäß entwickelt),
- Safeguards.

Eine Rückholung von Abfällen ist im Deutschen Endlagerkonzept derzeit nicht vorgesehen. Es wird von einem sicheren Einschluss in einer Salzformation ausgegangen.

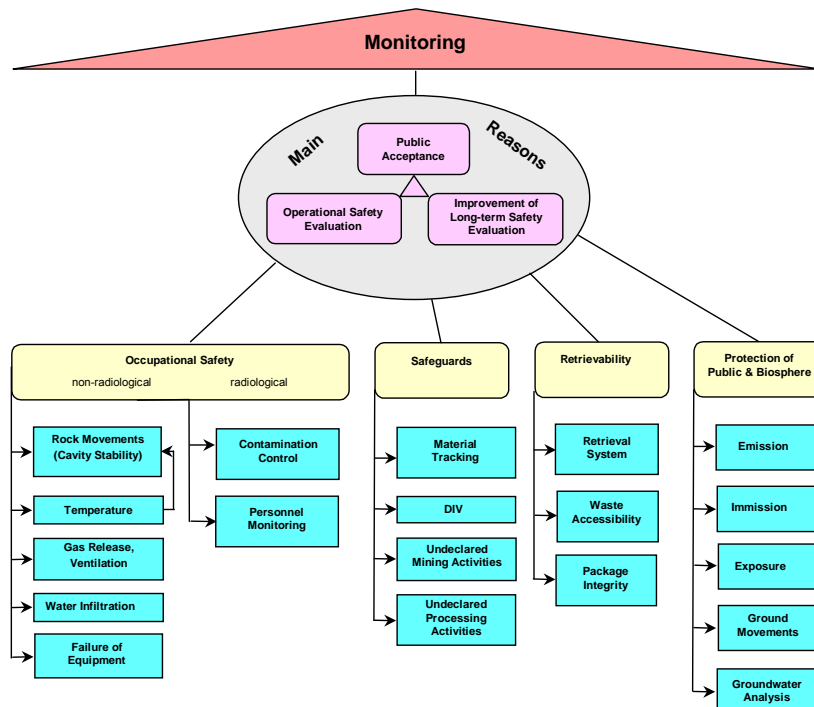


Abbildung 3-2: Endlagerüberwachung: Ziele und Aufgaben (EC 2004), in Anlehnung an Biurrun et al. (2001))

3.4.2 Andere Wirtsgesteine

3.4.2.1 Großbritannien

Genauso wie die ANDRA plant auch die Nirex, instrumentierte Einlagerungskammern oder -strecken in Pilotanlagen zu überwachen, um Wissen über die Entwicklung der technischen Barriere und das Nahfeld zu erhalten (EC 2004). Solche Pilotanlagen sollen in verschiedenen Bereichen des Endlagers entstehen.

4 Messtechnik und Messmethoden in der Endlagerüberwachung

In Deutschland befasst sich die DIN 1319-1 mit den Grundbegriffen der Messtechnik, für den Begriff *Messtechnik* selbst wird in den DIN-Normen jedoch keine Definition geliefert. Allgemein werden unter Messtechnik die Geräte und Messmethoden zur Erfassung physikalischer Größen verstanden. Als Messsystem wird die Gesamtheit aus Messtechnik, Mensch und Umwelt bezeichnet.

4.1 Anforderungen an die Messtechnik

Als Grundlage für ein Messprogramm müssen die technischen und funktionalen Anforderungen an die Messtechnik und das Messsystem ermittelt werden (EC 2004). Die Anforderungen hängen vom nationalen Endlagerkonzept ab (Wirtsgestein, Rückholbarkeit, Abfallinventar, u. a., vgl. Kapitel 3.1) und variieren in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms. Aufgrund der Unterschiede in den nationalen Endlagerkonzepten ist es nicht möglich, international einheitliche Vorgaben für das Überwachungsprogramm zu machen (EC 2004). In EC (2004) werden folgende allgemeine Anforderungen an die Messtechnik formuliert:

- 1) Messung der gewünschten Messgröße,
- 2) sichere Interpretation und hohe Genauigkeit der Messdaten,
- 3) Überwachung ohne die betriebliche Sicherheit, die Leistungsfähigkeit der Barrieren oder die Langzeitsicherheit zu beeinträchtigen, d. h. das Überwachungssystem sollte nur eine vernachlässigbare Interaktion mit dem Endlager haben,
- 4) Überwachung unter Endlagerbedingungen,
- 5) Überwachung von entfernten und schwer zugänglichen Gebieten über lange Zeitdauern.

Die erste und die zweite Anforderung gilt für Messungen jeglicher Art, hingegen sind die restlichen Anforderungen endlagerspezifisch. Grundsätzlich sollte die Anwendbarkeit und die Verlässlichkeit der Messtechnik – insbesondere bei Verwendung neu entwickelter Messinstrumente – **vor** dem Einsatz in der Endlagerüberwachung nachgewiesen werden. Es muss im Einzelfall abgewogen werden, ob bewährte Messtechnik vielversprechender neu entwickelte Messtechnik vorzuziehen ist.

4.1.1 Messung der Messgröße

Voraussetzung für die Messung der gewünschten Messgröße ist, dass ein entsprechender Sensor und eine Messmethode verfügbar ist. Für manche Messgrößen (z. B. Temperatur) steht eine breite Auswahl an Messmethoden zur Verfügung (z. B. Widerstandsthermometer, optischer Sensor, Schwingquarzsensoren). Für andere Messgrößen, wie z. B. für die in-situ-Messung bestimmter chemischer oder radiologischer Parameter, existiert bislang keine Messtechnik.

Es muss möglich sein zu unterscheiden, ob das Messsignal tatsächlich die Messgröße wiedergibt oder nur eine Sensorabweichung oder Sensorversagen anzeigt. Das setzt voraus, dass der Einfluss der Messung auf die Messgröße vernachlässigbar ist, so dass das Messsignal lediglich auf die natürliche Entwicklung der Messgröße zurückzuführen ist. In der Praxis geht jedoch jede Messung mit einer Störung des Systems einher. Es ist sehr wichtig, alle Prozesse, die das Messsignal beeinflussen könnten, zu verstehen, da die meisten Sensoren auf Variationen mehrerer Messgrößen reagieren können. Ferner muss in einem System wie einem Endlager, in dem mehrere Messgrößen sich gleichzeitig verändern (z. B. Temperatur, Druck und Deformation), ein Messsystem eingesetzt werden, das eine Methode beinhaltet, die den Einfluss jeder Messgröße auf das Messsignal identifiziert.

Ein geeigneter Sensor weist eine Messpräzision und einen Messbereich auf, der die Überwachungsanforderungen erfüllt. Ein Beispiel für eine Überwachungsanforderung ist das Ermöglichen des Vergleich mit Modellergebnissen.

Eine Qualitätssicherung ist unverzichtbar, um sicherzustellen, dass die Messdaten präzise und zuverlässig sind.

4.1.2 Interpretation der Messdaten

Im Allgemeinen wird nach der Messung ein Vergleich gemacht zwischen dem Messwert und dem erwarteten Wert, der z. B. das Ergebnis einer Modellsimulation sein kann. Stimmen die beiden Werte gut überein, wird der Messwert mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen. In diesem Fall wird das Vertrauen in das Prozessverständnis und die darauf basierte Modellkonzeption gestärkt. Bestehen jedoch signifikante Abweichungen zwischen dem erwarteten und dem gemessenen Wert, ist die Untersuchung sowohl des Messsystems als auch der Prozessmodells erforderlich.

Die Voraussetzung für ein robustes Überwachungssystem ist, dass es möglich ist zu zeigen, dass das empfangene Datensignal mit der Entwicklung der Messgröße korrespondiert. Auch die Entwicklung des Sensorsignals sollte bekannt sein, um unterscheiden zu können, ob das Sensorsignal von der Messgröße beeinflusst wird oder auf das Ausfallen oder Abdriften des Sensors zurückzuführen ist.

Redundante Messungen helfen, das Vertrauen in die Messmethode aufzubauen. Durch mehrfache Messung entweder derselben Messgröße oder korrelierter Messgrößen mit unterschiedlicher Messtechnik lassen sich die Messungen bestätigen. Durch parallelen Einsatz desselben Messsystems lässt sich die Entwicklung des Messsystems von der Entwicklung der Messgröße unterscheiden.

Kann ein Messwert nicht bestätigt werden – ist also der Sensor oder Teil des Messsystems fehlerhaft – kann der Sensor entweder ausgetauscht oder neu kalibriert werden (wenn der Sensor zugänglich ist) oder der Sensor kann stillgelegt werden (wenn er nicht zugänglich ist oder die Daten nicht länger benötigt werden).

Besteht ein Unterschied zwischen einem durch mehrfache Messungen bestätigtem Messwert und der Modellvorhersage, dann sollte die Modellvorhersage verworfen werden. In diesem Fall ist zu hoffen, dass ausreichend neue Messdaten zur Verfügung stehen, um die Modellannahmen und die Modelle selbst auf den neuesten Stand zu bringen. Die Auswirkung der Modellaktualisierung auf den Langzeitsicherheitsnachweis ist zu prüfen.

Die Aktualisierung von Modellen kann in zwei Kategorien eingeteilt werden: die *vorhergesehene Aktualisierung* ist durch unsichere Modellannahmen begründet, die *unvorhergesehene Aktualisierung* hingegen rührt von nicht ausreichender oder fehlerhafter Systemkenntnis. Im zweiten Fall herrschte bei der Modellerstellung keine Unsicherheit sondern eine falsche Systemvorstellung. Im zweiten Fall besteht die Notwendigkeit der Revidierung bzw. der Aktualisierung der Systemvorstellung, was sich auf den Sicherheitsnachweis auswirken kann und die Gefahr der Schwächung des Vertrauens in das Endlagerkonzept birgt.

4.1.3 Messen, ohne den Betrieb oder die Langzeitsicherheit zu beeinträchtigen

Die Endlagerüberwachung darf die betriebliche Sicherheit, die Funktionsfähigkeit der Barrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen. Dies gilt für alle Komponenten eines Messsystems (Sensoren, Kabel, Energiequellen, usw.). Beispielsweise müssen Brände oder Explosionen ausgeschlossen werden. Die Beeinträchtigungen, die von einem Überwachungssystem auf die Barrierewirkung und Langzeitsicherheit ausgehen, könnten gemindert werden, indem nach Erreichen des Messziels die Messinstrumente entfernt und die zurückgebliebenen Hohlräume verfüllt und versiegelt werden. Von einem Messsystem zurückgebliebene Öffnungen dürfen jedoch keine präferenziellen Fließwege bilden und chemische Verunreinigungen aus der Verwitterung der Messsysteme dürfen nicht das chemische Milieu verändern oder die Barrierenwirkung beeinträchtigen.

Um die potenzielle Beeinträchtigung der technischen Barriere durch die Endlagerüberwachung zu bewerten, sollte die verfügbare Messtechnik und die Datenübertragung dem Grubenplan gegenübergestellt werden. Aus dem Vergleich lässt sich sehr gut ableiten, über welche Entfernungen das Messsystem aufgebaut werden muss, welche Betriebsabläufe davon beeinträchtigt werden, welche geotechnischen Barrieren dabei gekreuzt werden, und welche Spuren ein solches Messsystem in der Grube und in der geotechnischen Barriere hinterlässt.

Das Überwachungssystem für das verschlossene Endlager sollte einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Endlagersystem haben, ansonsten muss es explizit in Prozessmodellen berücksichtigt werden.

4.1.4 Messen unter Endlagerbedingungen

Während der übertägigen Erkundung und des Betriebs des Endlagers ist das Messsystem durch offene Bohrlöcher sowie Schächte und Strecken zugänglich, so dass sich die Überwachung des Standortes mit konventionellen Sensoren und konventioneller Daten-

Übertragungstechnik bewerkstelligen lässt. Jedoch ist der Bewegungsspielraum im Endlager längs einer Strecke, Bohrung oder in Kammern begrenzt, und die Messanordnung ist daher nicht immer an die Problemstellung anpassbar. Außerdem muss die Messtechnik unter speziellen und z. T. extremen Umweltbedingungen funktionieren. Tabelle 4-1 zeigt einige Umweltbedingungen, die in einem Endlager herrschen können. Die Zuverlässigkeit der Messung darf beispielsweise nicht durch folgende Faktoren beeinträchtigt werden:

- Temperatur,
- Feuchtigkeit,
- Druck und Scherung,
- aggressives chemisches Milieu,
- ionisierende Strahlung.

Hinzu kommt, dass in einem Endlager mit Staub, Feuchtigkeit und schwankenden Temperaturen zu rechnen ist, ferner herrscht im engen und verwinkelten Tunnelsystem reger Betrieb und im Zusammenhang mit den untertägigen Arbeiten kann es zu heftigen Erschütterungen und Stößen kommen.

Tabelle 4-1: Beispielhafte Umweltbedingungen im Nah- und Fernfeld eines Endlagers in 1000 m Tiefe (verändert nach RWMC (2005))

	Nahfeld	Fernfeld
Temperatur	max. 100 °C (im Salz max. 200 °C)	45 °C
Druck	11 MPa	10 MPa
Wasserqualität	Salzwasser / Süßwasser	Salzwasser / Süßwasser
Strahlung	Gammastrahlung, Neutronenstrahlung	-

Unter den in Tabelle 4-1 aufgeführten Bedingungen können bestimmte Messung schwierig werden. Beispielsweise ist die Funktionsfähigkeit vieler Sensoren bei Temperaturen um 100°C eingeschränkt. Die Materialien, aus denen die Messgeräte aufgebaut sind, müssen unter Endlagerbedingungen langlebig sein. Das Endlager ist eine aktive Umgebung, in der eingebrachte Materialien zu Veränderungen neigen. Beispielsweise darf das Material auch im aggressiven chemischen Milieu nicht schnell korrodieren. Hier sind u.U. spezielle Entwicklungen erforderlich. Z. B. hat die *Irad Gage Group* für ihre geotechnischen Instrumente einen speziellen rostfreien Stahl (*custom 450*) verwendet, der zwar teurer und aufwendiger in der Bearbeitung ist, sich jedoch als sehr widerstandsfähig erwiesen hat (Hanna 1985). Polymere sind anfällig für die Alterung bedingt durch Strahlung, daher sollte Kabelisolierung mineralbasiert sein (z. B. Verwendung von Aluminium oder Magnesiumpulver).

Viele Langzeituntersuchungen und Forschungsvorhaben haben zum Ziel, die Korrosionsresistenz unter Endlagerbedingungen zu erhöhen. Ein Weg, um die Alterung aufgrund der Korrosion zu verlangsamen und die Langzeitfunktionsfähigkeit der Sensoren zu verbessern, ist die Verwendung von keramischem oder Glas-basiertem Material.

Rückständige Gase in den Sensoren oder Übertragungssystemen, die bei Strahlung der Ionisation unterliegen können, liefern ein falsches Messsignal. Die Zuverlässigkeit und Langzeitwirksamkeit von Messgeräten kann erhöht werden, wenn die Messumwandler im

Vakuum gebaut werden oder durch eine wasserdichte Verarbeitung (Hanna 1985). Beispielsweise können Schwingsaiten im keimfreien Raum zusammengebaut und dann mit einer Elektronenstrahl-Schweißmaschine so verschweißt werden, dass jede Verbindung wasserdicht ist. Die Dichtigkeit der Schweißnähte kann mit Stickstoff getestet werden. Durch die Isolierung der Schwingsaite von der Umgebung ist die Langzeitwirksamkeit des Messwandlers gewährleistet.

Bekannt ist, dass Kabel über lange Distanzen Wasser leiten können, mit dem Potenzial, angebundene Sensoren zu zerstören. Um die Zerstörung der Messeinrichtungen zu verhindern, müssen Anschlüsse und Kabel wasserdicht verpackt werden. Kabel können aufgrund der Deformation durch Konvergenz oder Quellen reißen und konvergierendes Wirtsgestein erhöht den lithostatischen Druck, der die Zerstörung von Sensoren bewirken kann.

Wichtig ist, die Messtechnik für aufgrund der Wärmeentwicklung oder der Strahlenexposition nicht mehr zugängliche Endlagerteile sowie für das geschlossene Endlager zu entwickeln bzw. die Anwendbarkeit der konventionellen Messtechnik in der Schließungs- und Nachbetriebsphase zu untersuchen. Um die geeignete Messtechnik zu entwickeln muss im Vorfeld geklärt werden, Wo, Wie häufig und Wie lange die Messung durchgeführt werden soll (RWMC 2005). Der Schwerpunkt liegt dabei auf langlebigen, robusten, störungsfreien Sensoren sowie auf der kabellosen Übertragung von Messdaten unter Endlagerbedingungen. Des weiteren muss für die schnelle und automatisierte Datenerfassung geeignete Rechnerhardware und -software zur Verfügung stehen.

Werden Sensoren fern von den Datenaufnehmern installiert, besonders wenn die Überwachung von verschlossenen oder versiegelten Bereichen geplant wird, müssen die Signaldämpfung und mögliche Interferenzen berücksichtigt werden. Der Abstand zwischen Sensor und Datenaufnehmer kann zwischen 10er Metern und einigen Kilometern liegen.

Die Alterung der Messsysteme wird von der Alterung der technischen Einrichtung überlagert, in die das Messsystem eingebaut ist. Die Prozesse lassen sich evtl. nicht auseinander halten.

4.1.5 Langzeitmonitoring

Die Endlagerüberwachung wird sich mindestens über die Dauer der Betriebsphase, also über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten oder mehreren Generationen, erstrecken und Messungen in entfernten, ggf. auch nicht mehr zugänglichen Endlagerteilen erfordern. Während der langen Messdauer können sich die Umgebungsbedingungen ändern. Die fürs Langzeitmonitoring adäquate Messtechnik muss robust und langlebig sein, für sie gelten folgende Bewertungskriterien:

- Lebensdauer,
- Verlässlichkeit (Zuverlässigkeit bei hoher Präzision),

- Resistenz gegenüber einer Bandbreite von Umweltbedingungen (Temperatur, mechanische und geochemische Einwirkung),
- Instandhaltungsbedarf.

Bei fehlendem Zugang muss ein robustes Messsystem eingesetzt werden, dessen Entwicklung bekannt und vorhersagbar ist und das keiner Instandhaltung oder Neukalibrierung bedarf. Bei der langen Dauer der Datenerhebung von bis zu 100 oder mehr Jahren ist die Alterung des Messsystems unumgänglich und ohne Möglichkeit der Instandhaltung oder Nachkalibrierung ist mit einer Abnahme der Sensor- und Übertragungsverlässlichkeit im Laufe der Zeit zu rechnen. Wenn der Sensor nicht mehr zugänglich ist, ist die Länge der Überwachung auf die Lebensdauer des Messsensors zum Zeitpunkt der Installation beschränkt.

Verfügbare Feldmessungen deuten darauf hin, dass die Messtechnik für die zuverlässige Überwachung über einige Jahrzehnte verfügbar ist. Beispielsweise haben Schwingensaitensensoren eine geschätzte Lebensdauer von 50 Jahren. Optische Sensoren und Kabel haben eine ähnlich lange Verlässlichkeit. Viele Messinstrumente sind jedoch nicht für den dauerhaften Einsatz in unzugänglichen Räumen ausgelegt und bei vielen Sensoren ist die Lebensdauer gar nicht bekannt. Die Vorhersage der Lebensdauer eines Messsystems spielt daher eine wichtige Rolle bei der Planung eines Überwachungsprogramms und es ist wichtig, Untersuchungen auf diesem Gebiet durchzuführen. Für die Überwachung über noch längere Zeiträume (Größenordnung von Jahrhunderten) haben FuE auf dem Gebiet der robusten Messtechnik Priorität, um Überwachungsprogramme zu unterstützen. In der langen Betriebszeit des Endlagers muss die Messtechnik mit dem Stand der Technik weiterentwickelt werden.

Es sollte grundsätzlich eher bewährte, über lange Zeit in situ erprobte und als zuverlässig erwiesene Messtechnik eingesetzt werden, als neue Messtechnik (EC 2004).

Die Anforderungen an die Messtechnik können sich mit Fortschreiten des Endlagerprogramms ändern. Beispielsweise können Bereiche, die zunächst nah an einer Datenerfassungsstation sind, zu entfernten und nicht-zugänglichen Bereichen werden und die lokalen Bedingungen können sich ändern (z. B. durch Temperaturentwicklung, Spannungsumlagerung). Die Planung und Installation des Überwachungssystem muss Hand in Hand gehen mit dem Endlagerprogramm, so müssen z. B. später unzugängliche Bereiche, die auf lange Sicht überwacht werden sollen, vor ihrer Schließung instrumentiert werden können.

Sind Instandhaltungsmaßnahmen möglich, kann eine Nachkalibrierung in bestimmten (von den Messgeräteeigenschaften wie z. B. Gerätedrift abhängigen) zeitlichen Abständen eingeplant werden und die Lebenszeit der Messtechnik kann damit verlängert werden.

4.2 Auswahl der Messtechnik

Bei der Aufstellung eines Endlagerüberwachungsprogramms ist die Auswahl der Messtechnik entscheidend. Für die Auswahl der Messtechnik sind zunächst die Anforderungen und Einschränkungen zu identifizieren. Im nächsten Schritt könnte es von Nutzen sein, eine Bestandsaufnahme der existierenden, bewährten oder vielversprechenden Messtechniken durchzuführen (EC 2004). Diese Bestandsaufnahme sollte die hinsichtlich der Anforderungen an die Messtechnik die für die Endlagerüberwachung relevanten Informationen beinhalten. In EC (2004) wurde dafür das folgende Informationsblatt beispielhaft vorgeschlagen:

Tabelle 4-2: In EC (2004) vorgeschlagenes Informationsblatt Messtechnik, verändert

Allgemeine Beschreibung
gemessener Parameter; Messprinzip; Beschreibung des Messinstruments; Größe und Gewicht des Messinstruments;
Beschreibung des Messwerts
Messbereich; Auflösung; Messfehler; Präzision über den ganzen Messbereich gegeben?; ...
Betriebseigenschaften
Installation; Kalibrierung; Instandhaltung; erwartete Lebensdauer; Zugangsbedarf; Energieversorgung; zusätzlicher Bedarf (Teile, Verbindungen, ...) Toleranzbereich für Temperatur, Druck, mechanische Beanspruchung, chemisches Milieu, radiologische Verhältnisse; ...
Signaleigenschaften
Signaloutput; Signalbereich; ...
Störempfindlichkeit
Relevante vorausgehende Erfahrungen
Feldmessungen; Arbeitsreferenz; Fertigung; anwendbare Norm
Interaktion mit dem Sicherheitsnachweis
Hydrologischer footprint, potenzial mechanical footprint; potenzial chemical footprint
Kosten
Anschaffung; Installation; Betriebs- und Instandhaltungskosten

Im folgenden werden einige in Tabelle 4-2 genannte Kriterien näher erläutert. Dabei handelt es sich um allgemeine Kriterien zur Beschreibung eines Messgeräts, nicht gebunden an ein Endlagerüberwachungsprogramm.

Messbereich

Der **Messbereich** gibt den Änderungsbereich der Messgröße in Einheiten der Eingangsgröße an, für den die vom Hersteller zugesagte **Messgenauigkeit** gilt.

Auflösung

Die **Auflösung des Messbereiches** ist die kleinste unterscheidbare Messwertgröße. Die Auflösung ist wesentlich kleiner als der Messbereich und sollte mindestens eine Zehnerpotenz kleiner sein als die Messgenauigkeit, damit durch die Auflösung keine nennenswerten Abweichungen entstehen.

Messfehler (Messabweichung)

Der Messfehler stellt die Abweichung des Messergebnisses vom abgelesenen Wert der Messgröße dar: **Messergebnis = Abgelesener Wert + Messfehler.**

Der wahre Wert einer Messgröße ist in der Regel nicht bekannt. Bei Messfehlern werden grobe, systematische oder zufällige Fehler unterschieden.

Auf **zufällige Messfehler** hat man keinen Einfluss, denn sie gehen auf unbekannte (zufällige) Ereignisse zurück. Nach dem *Zentralen Grenzwertsatz der Statistik* gleichen sich zufällige Fehler bei wiederholten Messungen aus und streben der Normalverteilung zu. Zufällige Messfehler sind unvermeidbar. Man bekommt sie in den Griff, wenn man die Messgröße häufig genug gemessen hat.

Der **systematische Messfehler** ist durch die Unvollkommenheit der Messtechnik hervorgerufen. Es handelt sich entweder um einen Gerätefehler oder eine fehlerhafte Modellvorstellung vom vermessenen System. Der systematische Messfehler weicht entweder nach oben oder nach unten vom wahren Wert ab, besitzt also ein Vorzeichen. Systematische Messfehler sind schwer zu identifizieren. Ist der systematische Messfehler erkannt, lässt er sich korrigieren bzw. durch stetige Kontrolle der Messtechnik eingrenzen, vorausgesetzt dass der wahre Messwert bekannt ist. Der systematische Messfehler wird ermittelt, indem dieselbe Messung mit verschiedenen Messverfahren bzw. Messinstrumenten durchgeführt wird.

Grobe Messfehler beruhen auf menschlichen Fehlern, z. B. Vergesslichkeit oder Unachtsamkeit, und sind vermeidbar. Sie sind als Ausreißer in einer Messreihe häufig leicht erkennbar und können durch Ausschneiden aus der Messreihe leicht korrigiert werden. Durch Kontrollen oder durch ein effizientes Qualitätsmanagement können grobe Messfehler minimiert werden.

Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit gibt an, wie nah der Messwert am wahren Wert der Messgröße liegt. Die Messgenauigkeit ist abhängig vom Messverfahren und wird durch wiederholte Messung an einer Probe ermittelt.

Reproduzierbarkeit

Um die Reproduzierbarkeit zu ermitteln, werden an derselben Probe, vom selben Bediener und unter Anwendung desselben Messverfahrens wiederholt Messungen durchgeführt. Die Standardabweichung der erhobenen Messwerte ist ein Maß für die Reproduzierbarkeit.

Vergleichspräzision

Die Vergleichspräzision bezeichnet die Präzision unter Vergleichsbedingungen. Sie wird durch Messungen unter abgeänderten Versuchsbedingungen ermittelt. Dabei wird immer nur eine Versuchrandbedingung geändert, beispielsweise:

- Messgerät (jedoch muss derselbe Typ verwendet werden),
- Messort,
- Bediener,
- Probe (Verwendung von Referenzmaterial mit vergleichbaren Eigenschaften).

Stabilität

Die Stabilität bezeichnet das Vermögen des Messgeräts, über einen gewissen Zeitbereich eine konstante Anzeige zu erreichen. Durch Alterung des Messgeräts ändern sich seine Eigenschaften im Laufe der Zeit und die Messdaten können durch eine gerätebedingte Drift verfälscht werden. Durch Kalibrierung in festgelegten Zeitabständen kann die Stabilität des Messwerts aufrecht erhalten werden. Die Stabilität wird durch wiederholte Messung in bestimmten Zeitabständen an einer Probe unter Anwendung desselben Messverfahrens ermittelt. Die Abweichung zwischen den zu verschiedenen Zeitpunkten gemessenen Werten ist ein Maß für die Stabilität des Messwerts.

Linearität

Zur Untersuchung der Linearität werden vom selben Bediener unter Anwendung derselben Messmethode an mehreren Proben Messungen einer Messgröße vorgenommen. Die Eigenschaften der verwendeten Proben sollen den in der Praxis zu erwartenden Wertebereich abdecken. Jede Probe wird mehrmals gemessen und für jede Probe wird der Mittelwert gebildet. Für jede Probe wird dann zunächst die Genauigkeit berechnet (Abweichung zwischen dem aktuellen Wert und dem Mittelwert). Ist die Genauigkeit für jede Probe unterschiedlich groß, so ist die Messung nicht linear.

4.3 Messprogramm

Für die Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation der Überwachung von technischen und natürlichen Objekten werden in der DIN 18710-4 Vorgaben gemacht. Normfestlegungen sind erforderlich, damit die Qualität sowie der Nachweis der Messungen vereinheitlicht und die Interpretierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden.

Die Instrumentierung hängt von der Messerfordernis und von dem Ort der Messung ab. Die Dichte der Messinstrumente kann bei dem selben Messziel in verschiedenen Endlagerbereichen unterschiedlich ausfallen. Mit einer hohen Dichte ist bei folgenden Erfordernissen zu rechnen:

- redundante Messungen,
- Messung der räumlichen Verteilung von Parametern,
- Messung vieler verschiedener Parameter.

4.4 Messsystem

4.4.1 Sensoren

Sensoren dienen der Aufnahme eines (oft) nichtelektrischen physikalischen Signals (Messgröße) und der Umwandlung des Signals in ein brauchbares und übertragbares elektrisches, optisches oder elektromagnetisches Signal. Die Aufnahme des nichtelektrischen physikalischen Signals beruht auf der Beeinflussung der elektrischen, optischen oder elektromagnetischen Eigenschaften des Sensors durch die Messgröße. Voraussetzung für die Sensorik ist, dass der Zusammenhang zwischen dem einwirkenden nichtelektrischen physikalischen Signal und den beeinflussten elektrischen Eigenschaften des Sensors bekannt ist. Sensoren werden am häufigsten nach folgenden Kriterien klassifiziert:

- Physikalisches Wirkprinzip
Je nachdem, welche Eigenschaft des Sensormaterials verändert wird, lassen sich beispielsweise mechanische, chemische, optische oder elektrische Sensoren unterscheiden.
- Messgröße
Mögliche Messgrößen sind: elektrische Spannung, Temperatur, magnetische Feldstärke, Dehnung, elektromagnetische Strahlung oder Luftfeuchtigkeit.
- Funktionsweise
Es werden aktive und passive Sensoren unterschieden: **passive Sensoren** benötigen zum Erfassen einer Messgröße eine Hilfsenergie, während **aktive Sensoren** ohne diese zusätzliche Energie auskommen.

Die folgende Tabelle gibt ausgewählte Messgrößen und die für ihre Messung geeigneten Sensoren an. In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Sensoren beschrieben.

Tabelle 4-3: Geeignete Sensoren für ausgewählte Messgrößen

Messgröße	Sensoren bzw. Sensorprinzipien zur Erfassung der Messgröße
Beschleunigung	Biegebalken mit seismischer Masse, faseroptische Sensoren, elektromagnetische Sensoren, piezoelektrische Sensoren, elektromagnetische Sensoren nach Wirbelstromprinzip, ...
Dehnung	piezoresistiver Sensoren, kapazitive Sensoren, Resonanzsensoren
Druck	piezoresistive Sensoren, kapazitive Sensoren, Resonanzsensoren, Dehnungsmessstreifen, Impulsdraht-Sensor, Passivdrucksensoren, Relativdrucksensoren, Absolutdrucksensoren und Differenzdrucksensoren
Durchfluss	elektromagnetische Sensoren, magnetisch-induktive Sensoren, Impulsdraht-Sensor, ...

Messgröße	Sensoren bzw. Sensorprinzipien zur Erfassung der Messgröße
Kluftentstehung	Akustische Emission (AE)
Kraft	piezoresistiver Effekt, kapazitive Sensoren, Resonanzsensoren, Dehnungsmessstreifen, piezoelektrische Sensoren, ...
pH-Wert	elektrochemische Sensoren (Glasmembranelektroden)
Porenwasserdruck	Feuchtemesser
Spannungsumlagerung	Akustische Emission (AE)
Temperatur	Thermoelemente, Thermosäulen, Heißleiter faseroptische Sensoren, ...
Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeits-Messsonde, ...
Wasserstand	Drucksensoren
Weg	induktive Sensoren, piezokeramische Sensoren, kapazitive Sensoren, elektromagnetische Sensoren, faseroptische Sensoren
Winkel	potentiometrische Sensoren, ...
Zug	Dehnungsmessstreifen, ...

4.4.1.1 Faseroptische Sensoren

Ein faseroptischer Sensor beruht auf der Abwandlung der Eigenschaften des durch eine optische Faser geführten Lichts durch die zu messende Größe (Zeh et al. 2002). Bei einem intrinsischen Sensor wirkt die Messgröße direkt auf die Fasereigenschaften ein. Bei einem extrinsischen Sensor wird die Abwandlung extern verursacht und die optische Faser dient lediglich der Übertragung des abgewandelten Lichts. Das Licht wird in seiner Intensität, Wellenlänge, Zeitabhängigkeit, Phase oder Polarisation beeinflusst, so dass sich für den zu messenden Wert ein charakteristisches Spektrum ergibt.

Die meisten physikalischen und chemischen Parameter können dadurch erfasst werden, wie z. B. Temperatur, Druck oder Feuchtigkeit bzw. das Auftreten verschiedener Gase. Ferner können sicherheitsrelevante Parameter wie Verformung, Verschiebung, Temperatur und Spannung sowie das Auftreten von Wasser und verschiedener Gase mit optischen Sensoren gemessen werden (Jobmann et al. 1999). Faseroptische Sensoren weisen gegenüber anderen Sensoren eine Reihe von Vorteilen auf :

- keine Beeinflussung durch äußere elektromagnetische Felder, hohe Temperaturen, Wärmestrahlung oder radioaktive Strahlung,
- keine elektrischen Felder innerhalb des Sensorkopfes,
- keine leitfähige Verbindung zwischen Sensor und Auswerteeinheit,
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen extreme Umwelteinflüsse,
- widerstandsfähig gegen chemische Korrosion,
- sicherer Einsatz in explosionsgefährdeten oder korrosiven Medien,
- geringe Messwertverfälschungen durch minimale Wärmeableitung und Wärmekapazität,
- hohe Messwertauflösung (Dehnungen in Bereich $\epsilon \sim 10^{-6}$, Temperatureauflösung von $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$),

- hohe räumliche Auflösung,
- hohe Wiederholgenauigkeit,
- geringer Platzbedarf für die Sensorik und die Verkabelung,
- niedrige Faserdämpfung ermöglicht Messungen über große Entfernungen (bis zu 85 km),
- minimale Störung der zu untersuchenden Struktur,
- Möglichkeit der Einbindung in optische Netze.

Jedoch bringen faseroptische Sensoren auch Nachteile mit sich:

- die chemische und strukturelle Beständigkeit optischer Sensoren ist nicht bekannt, sie kann nur anhand von Erfahrungen mit faseroptischen Kabeln abgeschätzt werden (RWMC 2005).

4.4.1.2 Elektrische Sensoren

Beispiele für elektrische Sensoren sind resistive, induktive und kapazitive Sensoren. Induktive Sensoren basieren auf dem Induktionsgesetz, wonach die Bewegung eines Magneten in einer Spule eine elektrische Spannung induziert. Entsprechend sendet ein induktiver Sensor ein elektromagnetisches Feld aus, das durch die Messgröße verändert wird. Ein Oszillator misst die durch die Änderung des elektromagnetischen Felds induzierte elektrische Spannung. Mit induktiven Sensoren lassen sich Winkel, Wege und Geschwindigkeiten berührungslos messen. Resistive Sensoren beruhen auf der Änderung des elektrischen Widerstandes des Sensors durch die Einwirkung der Messgröße. Dazu gehören Dehnungsmessstreifen, bei denen die mechanische Dehnung die Änderung des elektrischen Widerstandes verursacht. Sie dienen der Druck, Kraft- oder Wegmessung. Kapazitive Sensoren beruhen auf einer Änderung der Kapazität eines Kondensators. Sie können beispielsweise für die Weg-, Druck- oder Füllstandsmessung angewendet werden.

4.4.1.3 Piezoelektrische Sensoren

Piezoelektrische Sensoren können für die Messung von Druck, Beschleunigung, Spannung oder Kraft eingesetzt werden. Das Messprinzip beruht auf dem piezoelektrischen Effekt: die Messgröße wirkt auf das piezoelektrische Material ein und erzeugt eine mechanische Verformung, die eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte zur Folge hat. Die dabei entstandene Ladung ist proportional zur wirkenden Kraft. Piezoelektrische Sensoren haben viele Vorteile:

- kleine Abmessungen,
- preiswert,
- relativ hohe Empfindlichkeit,
- extrem kleiner Messweg,
- hohe Eigenfrequenzen,
- hoher Messbereich (z. B. Druckmessbereich zwischen 2 μb bis 25.000 bar),

- das Elastizitätsmodul von piezoelektrischen Materialien ist mit dem Elastizitätsmodul des zu vermessenden Materials vergleichbar,
- inhärente Material- und Temperaturstabilität,
- die hohe Eigenfrequenz und die sehr gute Linearität führen zu einer ausgezeichneten Robustheit der piezoelektrischen Sensoren,
- keine Beeinflussung durch elektromagnetische Felder und Strahlungen,
- einige piezoelektrische Materialien (z. B. Turmalin und Galliumphosphat) besitzen eine hohe Stabilität über weite Temperaturbereiche bis zu 1000 °C.

Die Nachteile piezoelektrischer Sensoren sind:

- sie erlauben nur die Messung dynamischer Vorgänge, da durch den Einsatz konventioneller Elektronik und nicht perfekt isolierender Materialien kontinuierlich Ladungen verloren gehen, was zu einem kontinuierlichen Signalabfall führt,
- lediglich die Kraft kann gemessen werden (z. B. wird für Druckmessungen die wirkende Kraft mit Hilfe von in das Kristallgitter eingebauten Dehnungsmessstreifen in Druck umgewandelt),
- die zwei für piezoelektrische Sensoren eingesetzten Materialgruppen haben entweder eine hohe Sensitivität (piezoelektrische Keramiken) oder eine hohe Langzeitstabilität (die einkristallinen Materialien Quarz, Turmalin und Galliumphosphat),
- aufgrund extremer Temperaturinterdependenz können piezoelektrische Sensoren oft nur in Kombination mit Temperatursensoren verwendet werden.

4.4.1.4 Chemische Sensoren

Chemische Sensoren werden dazu benutzt, chemische Inhaltsstoffe zu identifizieren und ihre Konzentration zu bestimmen, indem chemische Informationen in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Sie bestehen aus einer sensitiven Schicht und einem physikalischen Wandler (Transducer). Durch Einwirkung der zu erfassenden Stoffe werden die physikalisch-chemischen Eigenschaften der sensitiven Schicht reversibel geändert. Es existiert eine Vielzahl von chemischen Sensoren für die Erfassung unterschiedlicher chemischer Parameter.

4.4.1.5 Fazit Sensoren

Der Einsatz von Sensoren ist an bestimmte Umweltbedingungen gebunden, so dass nicht alle Sensoren unter Endlagerbedingungen verwendet werden können. Beispielsweise muss berücksichtigt werden, dass die metallischen Bestandteile von Sensoren in der chemisch aggressiven Umgebung im Endlager verändert werden, verwittern und korrodieren (z. B. Thermoelemente), so dass die Stabilität der Messung in Mitleidenschaft gezogen wird. Die langfristige chemische und strukturelle Beständigkeit von Sensoren unter Endlagerbedingungen ist jedoch oft nicht bekannt und muss noch untersucht werden. Bei der Wahl des Sensors müssen die Signalabschwächung und die Übertragungsentfernung berücksichtigt werden. Die meisten Sensoren und die dazugehörigen Empfänger brauchen zudem eine Energieversorgung, die vor allem im abgeschlossenen Endlagerbereich nicht gegeben ist.

Sensoren neigen oft dazu, auf mehr als eine physikalische Größe zu reagieren. Daher ist es erforderlich, unerwünschte Effekte zu kompensieren. Dies kann umgesetzt werden, indem ein zweiter Sensor den unerwünschten Effekt misst und der eigentliche Messwert um diesen unerwünschten Effekt reduziert wird. Dabei ist es erforderlich, beide Sensoren aufeinander abzustimmen. Damit ist sicherzustellen, dass beide Sensoren nicht nur für sich alleine unter Endlagerbedingungen robust funktionieren, sondern dass zusätzlich die Interaktion zwischen den Sensoren langfristig gewährleistet ist.

4.4.2 Übertragung von Messsignalen

An die Datenübertragung in einem Endlager werden aufgrund der besonderen Umgebungsbedingungen (vgl. Kapitel 4.1.4) besondere Anforderungen gestellt. Aufgrund der Länge der Strecken im Endlager sind die Daten oft über kilometerlange Distanzen und über mehrere Sohlen zu übertragen. Unter Tage werden für die Datenübertragung hauptsächlich drei Kanalarten eingesetzt (Becker 2006):

- Elektrische Leitungen (z. B. Zweidraht- oder Koaxialleitungen),
- Optische Leitungen (Lichtwellenleiter),
- Kabellose Datenübertragung mittels elektromagnetischer Wellen (Funk).

Datenübertragungskabel stellen eine Verbindung zwischen sensiblen Bereichen eines Endlagers bzw. zwischen abgeschlossenen Endlagerteilen und der Außenwelt her, daher können Datenübertragungskabel eine Beeinträchtigung der technischen Barriere darstellen. Übt ein Messsystem einen starken Einfluss auf die technische Barriere aus, ist es im Sicherheitskonzept explizit zu berücksichtigen.

4.4.2.1 Elektrische Kabel

Die Übertragung elektrischer Signale durch elektrische Kabel mit einem Kupferkern ist bei höheren Stromstärken und Spannungen besser. Die Datenübertragung unterliegt bei längeren Übertragungsstrecken der Signaldämpfung, des Weiteren können die Signale aufgrund elektromagnetischer Beeinflussung, die z. B. von im Bergwerk eingesetzten elektrischen Motoren oder Transformatoren ausgeht, gestört werden.

Grundsätzlich gilt, dass je höher die Datenrate sein soll, desto geringer darf die Entfernung sein, so dass eine gleichzeitige Erhöhung von Entfernung und Datenrate nur begrenzt möglich ist und nur mit einem erhöhten technischen Aufwand machbar ist. Niedrige bis mittlere Anforderungen an Datenrate und Entfernungen werden durch elektrische Leiter abgedeckt (Becker 2006).

Die allgemeine Fehlermöglichkeit über lange Zeitdauern ist durch Korrosion, mechanischen Widerstand des Kabels (z. B. auf Druck und Scherung ausgeübt durch die geotechnische Barriere oder das Wirtsgestein) begründet.

4.4.2.2 Glasfaserkabel

Glasfaserkabel (Lichtwellenleiter, faseroptische Kabel) sind geeignet, hohe Datenraten über große Entfernungen zu übertragen, denn in Glasfaserkabeln wird ein Messsignal über große Übertragungsentfernungen kaum abgeschwächt. Weitere Vorteile von faseroptischen Kabeln sind:

- keine Beeinflussung durch äußere elektromagnetische Felder,
- keine elektrischen Felder innerhalb des Sensorkopfes,
- keine galvanische Verbindung zwischen Sensor und Auswerteeinheit,
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen extreme Umwelteinflüsse,
- sicherer Einsatz in explosionsgefährdeten oder chemischaggressiven und korrosiven Medien,
- minimale Wärmeableitung und Wärmekapazität,
- niedrige Faserdämpfung ermöglicht Datenübertragung über große Entfernungen (bis zu 85 km),
- Multiplex-Eigenschaft: In Lichtwellenleitern ist die parallele Übertragung von Licht unterschiedlicher Wellenlängen auf mehreren Kanälen möglich, so dass mehrere Datenströme gleichzeitig durchgeleitet werden können. Auf diese Weise werden Übertragungstrecken optimal ausgenutzt.

Der Nachteil von Glasfaserkabeln ist, dass sie wenig dehnbar sind und zu Sprödebruch neigen.

4.4.2.3 Kabellose Übertragung

Die kabellose Signalübertragung durch offene Tunnel ist realisierbar und hat den Vorteil, dass die Installation und die spätere Entfernung von Kabeln entfallen. Mittels der kabellosen Technik könnten Signale vom Endlager direkt zur Oberfläche übertragen werden. Damit würden Kabel vollkommen entfallen, die den Betrieb stören sowie eine Verbindung zwischen offenen und verschlossenen Endlagerbereichen darstellen und die Funktion von geotechnischen Barrieren beeinträchtigen können.

Der große Nachteil der kabellosen Technik ist, dass eine lokale Energiequelle (eine Batterie) benötigt wird, um die Signale zu übertragen, was dann zum Tragen kommt, wenn ein verschlossener Endlagerbereich überwacht werden soll. In diesem Fall ist die Bewertung der Langzeitsicherheit der geotechnischen Barrieren unter Berücksichtigung des vom Sensor, der Signalemissionsquelle und der Energiequelle benötigten Platzes sowie der Langzeit-Zersetzungsprodukte dieser Komponenten vorzunehmen.

4.4.2.3.1 Datenübertragung mittels elektromagnetischer Wellen innerhalb des Endlagersystems

Die kabellose Datenübertragung mittels Funkwellen innerhalb des Endlagersystems stellt eine Herausforderung dar, denn Funkwellen werden vom umgebenden Gebirge reflektiert, so dass sich die Wellen gegenseitig auslöschen oder stark abschwächen. Das führt zu einer Dämpfung der Signale, so dass die Reichweite elektromagnetischer Wellen maximal 100 m beträgt (Becker 2006). Eine drahtlose Datenübertragung im Bergwerk setzt daher immer eine Kombination von weitreichender Kabelübertragung und nahe wirkender kabelloser Übertragung voraus. Für die Aussendung der Funksignale wird eine Energiequelle benötigt.

Bei der Übertragung von Informationen in geschlossenen Räumen, so auch in unterirdischen Hohlräumen, sind mit Radarwellen und Radiowellen die besten Ergebnisse hinsichtlich Reichweite und Antennengeometrie erreichbar (Becker 2006).

4.4.2.3.2 Datenübertragung mittels elektromagnetischer Wellen durch das Gestein hindurch

Die Übertragung von Daten durch das Gestein hindurch ist mit elektromagnetischen Wellen im tiefsten Frequenzbereich (Längstwelle, 10 – 100 KHz) und mit sehr hoher Sendeleistung zur Überwindung der Verluste der Bodenwelle möglich.

Beispielsweise stellt ein europäischer Sender der NATO mit mehreren 100.000 Watt angestrahelter Leistung und kilometerlangen Antennen die U-Boot Kommunikation mit den getauchten Booten sicher. Mit Mittelwellenfunknetzen beispielsweise ist bei entsprechenden Gesteinsverhältnissen die Übertragung von Signalen durch bis zu 300 m Fels hindurch möglich.

Die kabellose Signalübertragung durch den Untergrund ist derzeit Gegenstand von Forschungs- bzw. Entwicklungsprojekten und ist in der Prototyp-Phase für Anwendungen in der Erdölindustrie, beispielsweise für die Übertragung von Druck- und Temperaturmessungen.

4.4.3 Datenerfassung und Auswertung

Die Messsignale der Sensoren müssen über Datenkabel zu Multiplexern und von dort zu den Messwerterfassungsanlagen übertragen werden. Die Messwerterfassungsanlagen sind zentral aufgestellte Einheiten, die Messwerte sammeln, Grenzwertmeldungen erzeugen und die Daten für die nachfolgende Auswertung zur Verfügung stellen.

Bei einer Vielzahl von Messdaten besteht die Herausforderung darin, das Messnetz zu optimieren. Dabei sind die Datenströme zu optimieren, so dass die Zahl der Datenübertragungskabel und der Multiplexer bzw. Messwerterfassungsanlagen minimiert ist. Das erfordert, dass die Messgeräte an möglichst einem Bereich des Endlagers konzentriert sind, so dass auch die Datenströme konzentriert zusammenlaufen können.

Andererseits sollten die verschiedenen Messgeräte und die Datenleitungen sowie die weiter hinten angeschlossenen Geräte kompatibel sein. Ferner sollte die Software der Messwerterfassungsanlagen so ausgewählt sein, dass sie verschiedenartige Messdaten, die u. U. durch Messgeräte verschiedener Hersteller erfasst wurden, gleich gut verarbeiten kann.

Wichtig ist, die auf den Messwerterfassungsanlagen gespeicherten Messdaten in regelmäßigen Abständen zu sichern.

5 Beschreibung ausgewählter geotechnischer Überwachungsmethoden

5.1 Vermessung

5.1.1 Höhennivellement

Gemessener Parameter Höhendifferenz [m], absolute Höhe [mNN]

Messziel Vertikale Boden- oder Gebirgsbewegungen

Die Geländehöhe über dem Endlager muss in regelmäßigen Abständen gemessen werden, um die bergbauinduzierten Bodenbewegungen zu überwachen (übertägiges Nivellement). Die Höhenmessung an Festpunkten innerhalb des Endlagers (untertägiges Nivellement) ist erforderlich für die Erfassung vertikaler Gebirgsbewegungen, die für die Arbeitssicherheit und für die Charakterisierung des Verformungsverhaltens und der physikalischen Gebirgseigenschaften relevant sind.

Messprinzip

Geometrisches Nivellement

Beim geometrischen Nivellement wird mit einem optischen Nivelliergerät die Höhendifferenz zwischen zwei Messpunkten ermittelt. Das Nivelliergerät muss waagrecht aufgestellt werden und auf jedem Messpunkt wird eine Messlatte lotrecht aufgestellt. Die Maßeinteilung auf der Nivellierlatte gibt den lotrechten Abstand des Messpunktes von der waagerechten Zielachse des Nivelliergeräts an. Bei der Höhenmessung über längere Distanzen wird die Messstrecke in Abschnitte eingeteilt und die Höhendifferenz zwischen dem Ausgangs- und Endpunkt jedes Abschnittes wird vermessen: die Höhendifferenz zu einem Punkt dessen Höhe bekannt ist wird Rückblick genannt, und diejenige zu einem neuem unbekannter Punkt heißt Vorblick. Am Ende der Messstrecke werden die Höhenunterschiede aller Abschnitte addiert, um den Höhenunterschied für die gesamte Messstrecke zu erhalten.

Trigonometrisches Nivellement

Mit einem Winkelmessinstrument wird der Zenitwinkel und die Entfernung zum Messpunkt gemessen. Als Messinstrument kann ein Theodolit eingesetzt werden, oder auch ein Tachymeter, mit dem auch Schrägstrecken gemessen werden können. Daraus wird der Höhenunterschied in einfacher Näherung nach geometrischen Formeln gemessen.

Zeitliche Auflösung der Messung

Beispielsweise ist in Morsleben alle 2 Jahre ein übertägiges Feinnivellement vorgesehen. Das untertägige Nivellement ist in regelmäßigen Abständen sohlenübergreifend durchzuführen.

Messnetz

Übertägiges Nivellement: In Deutschland muss das amtliche Höhenfestpunktnetz durch weitere Festpunkte über dem Endlager und in seiner näheren Umgebung verdichtet werden, so dass der gesamte Einwirkungsbereich des Bergwerks abgedeckt ist. Die Einmessung dieser Festpunkte vor dem Beginn der Abteufarbeiten dient als Nullmessung.

Im Bereich des Endlagers Morsleben beispielsweise erstreckt sich das aktuelle Höhenfestpunktfeld über ein Gebiet von ca. 39 km² mit einer Linienlänge von ca. 92 km. Es besteht aus 320 Festpunkten. Die Messlinien verlaufen größtenteils an den Rändern von Wegen und Straßen innerhalb der überwiegend forst- und landwirtschaftlich genutzten Flächen. Die Vermarkung der Höhenpunkte besteht aus tiefstehenden Rohrfestpunkten unter Hydrantenkappen, Rammrohren, Rammrohren mit einer Betonummantelung sowie Mauer- und Pfeilerbolzen.

Untertägiges Nivellement: Im Endlager Morsleben werden beispielsweise 851 Punkte im Firstpunktnetz beobachtet.

Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit wird beeinträchtigt durch die ungenaue Ablesung der Millimeterangaben auf der Messlatte. Bei Zielweiten über 200 m ist die Erdkrümmung sowie die terrestrische Refraktion zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich eine Dezimeter-Genauigkeit für die Entfernung und eine Zentimeter-Genauigkeit für die Höhenangaben. Das Firstnivellement kann durch eine spezielle Aufhängevorrichtung auf Messgenauigkeiten von ± 1 mm gesteigert werden. Außerdem ist die Messgenauigkeit vom eingesetzten Gerät abhängig, die Messgenauigkeit eines Bautheodoliten beträgt $\pm 10''$, mit einem Präzisions- oder Sekundentheodolit lässt sich eine Genauigkeit von $\pm 1''$ erreichen.

Beispielsweise erlaubt das übertägige Nivellement in Morsleben statistisch abgesicherte Aussagen über Bewegungsraten ab $\pm 0,5$ mm/a, das untertägige Nivellement erlaubt statistisch abgesicherte Aussagen über Bewegungsraten ab $\pm 0,8$ mm/a (DBE 2007).

5.2 Kartierung

5.2.1 Fernerkundung

Unter Fernerkundung wird allgemein die Erfassung und Messung eines Objekts verstanden, bei der kein Kontakt zwischen Messobjekt und Messvorrichtung besteht (z. B. Barrett & Curtis 1976). Der Begriff wird jedoch häufiger in seiner engeren Bedeutung verwendet, wie in der DIN 18716-3 definiert, wonach unter Fernerkundung die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche oder anderer nicht direkt zugänglicher Objekte durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-)Felder verstanden wird; als Informationsträger dient dabei die reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung.

Bei der Fernerkundung entstehen sowohl photographische Bilder als auch Scanneraufnahmen. Unter Luftbildern werden photographische Aufnahmen verstanden, die von Flugzeugen aus gewonnen werden. Bei Satellitenbildern wird kein Unterschied zwischen photographischen Bildern und Scanneraufnahmen gemacht. Mittlerweile werden zunehmend auch von Flugzeugen aus Scanneraufnahmen gewonnen.

In der Photogrammetrie werden die Koordinaten im Luft- oder Satellitenbildsystem einer bestimmte Lage in einem geographischen Koordinatensystem zugeordnet. Die stereoskopische Messung ist eine photogrammetrische Methode, die auf dem mathematischen Verfahren der Zentralprojektion beruht, mit der aus sich überlappenden Bildern dreidimensionale Informationen abgeleitet werden. Bei der thematischen Bildbearbeitung werden den spektralen Intensitäts- bzw. Farbwerten der einzelnen Bildpunkte Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit an dieser Stelle zugeordnet. Dabei wird die ursprünglich kontinuierliche Bildinformation mittels statistischer Verfahren oder durch erfahrene Bearbeiter diskreten Eigenschaftskategorien zugeordnet.

Man unterscheidet zwischen optischen Sensoren und Radarsatelliten. Optische Sensoren erfassen die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung, stellen also passive Sensoren dar. Dagegen senden Radarsatelliten (aktiv) Mikrowellen aus und nehmen die Rückreflexion auf. Radarsatelliten sind unabhängig von der Sonneneinstrahlung und werden nicht durch die Wolkendecke gestört, sie können damit komplementär zu optischen Satelliten angewendet werden.

Mittels Fernerkundung können beispielsweise folgende Informationen erfasst werden:

- Höhe der Geländeoberfläche,
- Morphologie,
- Beschaffenheit der Landoberfläche (Vegetation, Boden/Gestein, Wasser),
- Vegetationsform (Art und Zustand der Vegetation),
- Erosion, Bodenabtrag, Bodenversalzung,
- Bodenfeuchte,
- Evapotranspiration,
- geologische Strukturelemente (Textur, Lineamente, u. a.),
- Infrastruktur (Bebauung, Straßen, Bahntrassen, u. a.),
- Kubaturen von Haufwerken (relevant z. B. für Safeguards),
- Temperatur.

Die Fernerkundung kann in allen Phasen eines Endlagerprogramms sinnvoll eingesetzt werden und ist speziell für die großräumige flächendeckende Umweltüberwachung in der Umgebung des Endlagers geeignet. Beispiele für den Einsatz der Fernerkundung im Zusammenhang mit Endlagern sind:

- Überwachung der Senkungen der Erdoberfläche über dem Endlager und der durch die geometrischen Veränderungen hervorgerufenen hydrologischen und ökologischen Veränderungen,
- Überwachung der Kubaturen von Haufwerken und Korrelation mit dem Endlager-Hohlraumvolumen im Rahmen der Safeguards.

Vorteile der Fernerkundung:

- großräumige und flächendeckende Rasterinformation,
- wiederholte Aufnahmen sind möglich und damit ist eine kontinuierliche Überwachung und das Verfolgen von bestimmten Entwicklungen möglich.

Nachteile der Fernerkundung:

- hohe Kosten,
- aufwändige Auswertung der Daten,
- optische Sensoren können die Wolkendecke nicht durchdringen, daher ist eine Korrektur erforderlich,
- Korrektur geometrischer Einflüsse erforderlich,
- indirekte Messung,
- der Spektralbereich und die Bodenauflösung sind vorgegeben durch die eingesetzten Satellitensensoren.

Im nächsten Abschnitt wird eine Auswahl von verfügbaren Satelliteninformationen näher beschrieben.

Landsat

Der amerikanische Landsat-Satellit ist mit zwei optischen Sensoren ausgestattet, deren Eigenschaften die folgende Tabelle zeigt:

Tabelle 5-1: Eigenschaften der Landsat-Satellitenaufnahmen (NASA 2008)

	Landsat MSS	Landsat TM
Betrieb	1972	1982
Wiederholungsrhythmus	16 Tage	16 Tage
Auflösung	80 m	30 m
Größe einer Szene	183 x 183 km	183 x 183 km
Spektrale Eigenschaften	4 spektrale Kanäle	7 spektrale Kanäle
Max. empfohlener Maßstab	1:200 000	1:75 000

Der Landsat Thematic Mapper (Landsat TM) liefert umfangreiche Informationen:

Tabelle 5-2: Zuordnung der Landsat TM-Spektralkanäle zu den Eigenschaften an der Erdoberfläche (NASA 2008)

Kanal	Strahlungsart	Wellenlänge [µm]	Information
1	blau-grün	0,45 – 0,52	Gewässer, Küstengewässer, Differenzierung Boden-Vegetation, Waldtypen, Verbauung
2	grün	0,52 – 0,60	Korrespondiert mit der grünen Reflexion einer intakten Vegetation; auch für Verbauung vs. Vegetation
3	rot	0,63 – 0,69	Unterscheidung von Pflanzenarten, Bodentypen, Mineralgehalte, geologische Anwendungen
4	nahes Infrarot	0,76 – 0,90	Korrespondiert mit der Biomasse der intakten Vegetation. Sehr wichtig für alle Anwendungen, in denen Vegetation unterschieden werden soll, vor allem auch in Verbindung mit Kanal 3.
5	mittleres Infrarot	1,55 – 1,73	Sensitiv für den Wassergehalt in Pflanzen, daher ebenfalls zur Differenzierung, aber auch für Trockenheitsschäden der Vegetation, Auch zur Unterscheidung Wolken, Schnee, Eis.
6	Thermales Infrarot	10,4 – 12,5	Schäden und Stress von Vegetation, vor allem aber dringt dieser Kanal in die oberste Bodenschicht ein und ist für bodenkundliche und geologische Anwendungen prädestiniert.
7	Mittleres Infrarot	2,08 – 2,35	Ebenfalls geologische und bodenkundl. Anwendungen, Boden- und Pflanzenfeuchtigkeit.

Die Landsat MSS-Daten sind kostengünstig, sie haben jedoch mit 80 m eine vergleichsweise grobe räumliche Auflösung und eine geringe spektrale Auflösung. Da optische Sensoren die Wolkendecke nicht durchdringen können, können die Landsat-Satellitenaufnahmen Lücken aufweisen.

SPOT

- optischer Sensor,
- sehr gute Auflösung von bis zu 10 m bzw. 5 m,
- Anwendung im Bereich der Landnutzung, Raumplanung, Kartographie, Ressourcenmanagement vor allem im differenzierten mitteleuropäischen Kulturraum,
- anwendbar im planungsrelevanten Maßstab von 1:50000 und darunter,
- der Satellit kann programmiert werden,
- Möglichkeit von Stereoaufnahmen.

IRS 1 C

- optischer Sensor,
- hohe Auflösung von 5,8 m,
- Wiederholungskapazität zwischen 5 und 24 Tagen,
- Anwendung in: Raumplanung, Kartographie, Umweltstudien, etc.

ERS – European Remote Sensing Satellite

- europäischer Radarsatellit,
- liefert Daten seit 1991,
- Wiederholrate 35 Tage,
- Bodenauflösung 30 m,
- Geeignet für Meer- und Eisstudien,
- Komplettiert die mit optischen Sensoren gewonnenen Landnutzungsdaten in Gebieten mit hoher Wolkenbedeckung.

JERS 1

- japanischer Satellit,
- ausgestattet mit einem optischen und einem Radarsensor,
- liefert Daten seit 1992,
- Wiederholrate 44 Tage.

Photographische Satellitenaufnahmen

Photographische Aufnahmen der Erdoberfläche wurden von der russischen Raumstation MIR aus gemacht. Diese Daten haben eine besonders hohe Auflösung und die einzelnen Aufnahmen sind mit einer Überlappung von 60 % gemacht, so dass sie sich zur Stereoauswertung eignen. Jedoch sind bestimmte Informationen auf diesen Aufnahmen aus Geheimhaltungszwecken nicht verfügbar. Die Erdoberfläche wird zwar nicht kontinuierlich komplett aufgenommen, jedoch könnten gewünschte Szenen vorab bestellt werden. Die photographischen Satellitendaten eignen sich besonders gut für Aufgaben, in denen eine hohe Detailerkennbarkeit gefordert ist.

5.2.2 Geologische Kartierung

5.2.2.1 Geologische Kartierung über Tage

Die geologische Kartierung stellt die Grundlage für die geologische Begutachtung eines Standortes dar. Bei der geologischen Kartierung werden folgende Elemente z. B. in die Topographische Karte im Maßstab 1:25.000 eingetragen:

- die räumliche Verbreitung der oberflächennahen Locker- und Festgesteine gleichen Alters und gleicher petrographischer Zusammensetzung,
- die Schichtgrenzen der Ablagerungen mit Angaben zum Schichtstreichen und -fallen,
- nachgewiesene und vermutete Störungen und Zerrüttungszonen sowie
- Aufschlüsse (z. B. Tunnel, Böschungen, Schächte, Stollen).

Auf Grundlage der geologischen Kartierung lassen sich ggf. die stratigraphische Abfolge und die Mächtigkeiten der einzelnen Gesteinsschichten ableiten. Durch Konstruktion von Profilschnitten kann ein räumliches geologisches Modell des Untersuchungsgebietes erstellt werden, das die Lagerungsverhältnisse mit Störungszonen und Verwerfungen beschreibt, vorausgesetzt, dass ein deutlicher Gesteinsversatz vorliegt. Das Auffinden von Zerrüttungszonen ist besonders wichtig, da solche tektonisch beanspruchten Bereiche eine höhere hydraulische Durchlässigkeit aufweisen und damit bevorzugte advective Transportwege bilden. Die Lokalisierung von ausgedehnten tektonischen Zerrüttungszonen ist jedoch nur mit Hilfe spezieller Methoden, z. B. mittels Fernerkundung oder durch seismische Messungen, möglich.

5.2.2.2 Geologische Kartierung unter Tage

Durch das Abteufen der Schächte ist es erstmalig möglich, Schichten im tiefen Aufschluss geologisch aufzunehmen. Die Aufnahme wird kontinuierlich mit dem Abteuffortschritt vorgenommen. Die geologischen Aufschlüsse in den Schächten sind oft nur während einer relativ kurzen Zeit zugänglich, da aus sicherheitstechnischen Gründen oft unverzüglich ein Ausbau eingebracht wird. Daher wird zur Ergänzung der gegebenenfalls subjektiven Kartierung in dem selben Maßstab eine Fotodokumentation angefertigt.

Bei der geologischen Kartierung im Schacht und in den Strecken bzw. Hohlräumen werden die relevanten Elemente in ein vorbereitetes Kartierungsformular eingetragen, dazu gehören:

- stratigraphische und lithologische Grenzen,
- Schichtung inklusive sedimentpetrographischer Besonderheiten,
- Klüfte,
- Kluffüllungen,
- Störungen,
- Entnahmepunkte von Proben.

Dabei ist das Einfallen und Streichen der Schichten, Klüfte und Störungen mit einem Gefügekompass zu ermitteln.

Die detaillierten geowissenschaftlichen Untersuchungen im Endlager beinhalten die geologische Kartierung der Stöße in den Strecken und Kammern im Maßstab 1:50 oder noch kleiner, falls Störungen oder komplizierte Lagerungsverhältnisse auftreten. Die kleinmaßstäbliche geologische Kartierung dient der Vorhersage des gebirgsmechanischen Verhaltens und der Planung der nächsten Schritte im Endlagerprogramm.

5.2.2.3 Bohrkernbeschreibung

Die Bohrkernbeschreibung beruht auf einer ersten lithologischen Ansprache und anschließender stratigraphischer Einstufung des Bohrkernmaterials durch den die Bohrung betreuenden Geologen.

5.2.2.4 Normalprofil

Das Normalprofil ist das Ergebnis der Auswertung von Sondierbohrungen, die die Bohrkernbeschreibung, die geophysikalischen Bohrlochmessungen und die Laboruntersuchungen am Bohrkernmaterial berücksichtigt. Dabei werden basierend auf der mineralogisch-petrographischen Zusammensetzung in der stratigraphischen Abfolge Leithorizonte bzw. stratigraphische Bezugshorizonte identifiziert.

Das Normalprofil ist eine idealisierte Darstellung der für den Standort typischen Schichtenfolge mit Angaben zu der mineralogisch-petrographischen Zusammensetzung, den durchschnittlichen Schichtmächtigkeiten, Fossilinhalt und charakteristischen Kurven der bohrlochphysikalischen Messverfahren. Die Darstellung erfolgt maßstabsgetreu, meist in Form eines Säulenprofils.

Normalprofile werden für die lithostratigraphische Gliederung neuer Bohrungen in einem Gebiet herangezogen, ferner helfen sie bei der Beschreibung der Schichtlagerung (Streichen und Fallen von Schichtflächen). Darüber hinaus können anhand von Normalprofilen Schichtausfälle und Störungen des Schichtverbandes, die möglicherweise hydraulisch wirksam und daher zu quantifizieren sind, identifiziert werden.

5.2.3 Photogeologische Kartierung

Das Ziel der photogeologischen Kartierung ist, durch die Auswertung von Luft- und Satellitenbilddaufnahmen über die geologische Kartierung hinaus Informationen zu erlangen. Bei der photogeologischen Kartierung werden insbesondere tektonische Strukturen erfasst. Diese sind von besonderem Interesse, da sie häufig erhöhte Wasserwegsamkeiten aufweisen und ihre hydraulische Bedeutung daher bewertet werden muss. Auf Luft- und Satellitenbildern sind geologisch bedingte gradlinige bis schwach gekrümmte, kartierbare Lineationen erkennbar, die sich durch ein großes Verhältnis von Länge zu Breite auszeichnen. Diese Lineationen können großräumige tektonische Strukturen wie Störungen, Klüfte, Schichtgrenzen oder Zerrüttungszonen darstellen. Auf Luftbildern mit geringem Vegetationsbestand lassen sich geologisch bedingte Lineationen besonders leicht ausmachen.

Bei der photogeologischen Kartierung werden topographische Karten als Referenzgrundlage für die Entzerrung der Luft- und Satellitenbilder und für die Identifizierung anthropogener Strukturen (z. B. Straßen) und nichttektonischer Strukturen (z. B. Flussläufe, Vegetationsgrenzen) benötigt. Geologische und tektonische Karten werden für den Vergleich zwischen bekannten Strukturen und den erkennbaren Lineationen verwendet.

Unter Einsatz von seismischen Methoden gewonnene Informationen über die Haupttrichtungen der Strukturen und Trennflächen im Untergrund können herangezogen werden, um die Informationen aus der Luft- und Satellitenbilddauswertung abzugleichen. Zum Beispiel konnte aufgrund der Fernerkundung der Erdoberfläche im Bereich des Endlagers Konrad weitgehend ausgeschlossen werden, dass kein direkter Bezug und damit keine Durchgängigkeit zwischen den Photolineationen und den aus dem Untergrund bekannten Strukturen besteht.

Die photogeologische Kartierung kann in der Standorterkundung für die Beschreibung der tektonischen Verhältnisse und damit indirekt für die großräumige Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes sowie in den späteren Phasen des Endlagerprogramms für die kontinuierliche Überwachung tektonischer Bewegungen eingesetzt werden. Endlager werden in Gebieten mit geringer tektonischer Aktivität errichtet, daher werden eigentlich keine geogenen tektonischen Bewegungen erwartet, sie sind jedoch nicht auszuschließen. Genauso kann nicht ausgeschlossen werden, dass die bergbauliche Tätigkeit großräumige tektonische Prozesse auslöst.

5.3 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Geophysikalische Bohrlochmessungen liefern kontinuierliche Profile geophysikalischer Parameter, die mit den physikalischen Eigenschaften der Gesteine bzw. mit ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung korrelieren. Es existieren viele geophysikalische Messmethoden für unterschiedliche Anwendungsgebiete (siehe Tabelle 5-3). Geophysikalische Messmethoden eignen sich beispielsweise für Aussagen über die Lithologie und die Porosität im durchfahrenen Bereich oder für die Lokalisierung von Schichtgrenzen und Klüften. In Tabelle 5-4 sind für bestimmte Verfahren die entsprechenden Eigenschaften verschiedener Gesteinsarten aufgeführt. Durch Kombination mehrerer geophysikalischer Messmethoden

kann die Zuverlässigkeit der Aussagen zu den physikalischen Eigenschaften gesteigert werden.

Tabelle 5-3: Gängige geophysikalische Messmethoden und ihre Anwendungsgebiete (Knödel et al. 1997)

	Arbeitsbezeichnungen	Abkürzungen	Einsatzbereiche
1	Kaliber Caliper	Kal, Cal CL, CAL CALP	Bohrlochdurchmesser Berechnung für Zementmenge Platzierung von Packern Anreicherungen von Spülungskuchen
2	Spontanes Potential	SP	Bohrungskorrelation Lokalisierung von Speichergesteinen Lokalisierung von Schichtgrenzen
3	Gamma Ray	GR	Bohrungskorrelation Abschätzung des Tongehalts Gesteinsidentifikation Lokalisierung von Schichtgrenzen
4	Sonic BHC-Sonic, Akustik Log, Acoustic Log Geschwindigkeitslog Borehole Compensated Sonic Acoustic Velocity Compensated Acoustic Velocity	SL, BHC-SL BHC, ALC Com AVL	Porosität Seismische Daten Synthetische Seismogramme Lokalisierung unnormaler Drücke Gesteinsidentifikation Lokalisierung von Schichtgrenzen
5	Neutron Neutron Density Sidewall Neutron Porosity Compensated Neutron Porosity Sidewall Neutron	N, GNT SNP CNL SWL, NL	Gesteinsidentifikation Porosität Lokalisierung von Erdgas
6	Dichte Density, Formation Density Densilog Compensated Density	DL FDC, Den Com Den	Dichte, Porosität Gesteinsidentifikation Synthetische Seismogramme Spezifisches Gewicht
7	Inductionslog Induction Electric Induction Dual Induction Induction Electrolog	IEL I-EL IL IES	Formationswiderstand Bohrungskorrelation Lokalisierung von Erdöl / Erdgas Salz- / Süßwasser
8	Widerstandslog Widerstand Resistivity	R Res Wid	Bohrungskorrelation Lokalisierung von Erdöl / Erdgas Salz- / Süßwasser F. Binot 2000

Tabelle 5-4: Lithologische Aussage von Bohrlogs (Jankowski 1983)

	Elektrische Messungen		Radioaktivitätsmessungen			Schallmessungen
	Leitfähigkeit, Widerstand	Spontanes Potential	Gamma-Ray	Neutron	FDL (Gamma-Gamma)	Sonic Log
Tone, Tonsteine	meist hohe Leitfähigkeit	hohe Spannungswerte	starke Strahlung	starke Absorption		relativ niedrige Geschwindigkeiten abhängig von der Porosität (Kompaktionszustand)
toniger Sand	geringer Widerstand	mittlere Spannungswerte	mittlere Strahlung	mittlere Absorption		
Sande, Sandsteine, grobklastische Gesteine	Leitfähigkeit u. Widerstand abhängig von Porenfüllung	geringe Spannungswerte	geringe Strahlung	Absorption abhängig von der Porosität! (stark bei großer Porosität)	Dichte abhängig von der Porosität (Kompaktionszustand)	Tone, Tonsteine: ca. 580 - 300 µs/m Sande, Sandsteine: ca. 500 - 200 µs/m
Kalke, Kalksteine, Dolomite	sehr geringe Leitfähigkeit, sehr hoher Widerstand Ausnahme: große Porosität	indifferent				sehr geringe Strahlung
Gips, Anhydrit	sehr geringe Leitfähigkeit		sehr hoher Widerstand	sehr geringe Strahlung	geringe Absorption	
Steinsalz	sehr hoher Widerstand	geringe Dichte				mittlere Geschwindigkeiten 240 - 220 µs/m
Kalisalze						mittlere bis hohe Geschwindigkeiten ca. 270-190 µs/m

5.3.1 Kalibermessung (CAL)

Messparameter Bohrlochdurchmesser [m]

Messziel

Ein Bohrloch ist nur in seltenen Fällen maßhaltig und kreisrund, häufig zeigt es Ausbrüche oder Auskesselungen. Kalibererweiterungen weisen auf ein klüftiges Gebirge oder lösliche Gesteine hin, wohingegen Kaliberverengungen durch quellende Tone auftreten können. Die Kalibermessung ist ein technisches Messverfahren zur Ermittlung des Bohrlochdurchmessers. Die Erfassung des Kalibers ist zur Ermittlung der Bohrlochkorrekturen unbedingt erforderlich. Viele geophysikalische Messungen sind abhängig vom Bohrlochdurchmesser (z. B. Gamma-Gamma Dichtemessung) und müssen korrigiert werden.

Messprinzip

Bei der Kalibermessung werden elektromechanische und akustische Meßsysteme angewandt. Bei den mechanischen Kalibermessungen werden am Sondenkörper befestigte Arme durch Federdruck oder hydraulisch an die Bohrlochwand angepresst. Die Spreizung dieser Arme sind ein Maß für den Bohrlochdurchmesser im entsprechenden Azimut. Der Bohrloch-

durchmesser wird durch Abtasten der Wand mit drei, vier oder sechs Messarmen bestimmt. Die Kalibermessungen mit 3-armigen Kalibermessern liefern gemittelte Kurven.

Die mechanische Kaliber-Sonde des Borehole Geometry Tool (BGT) mit 2 paarweise um 90° versetzten Messarmen gibt die Möglichkeit, den Durchmesser in zwei orthogonalen Azimuten zu erfassen. Das System mit der höheren Federspannung liefert dabei den Maximalwert. Die kleine Hauptachse des horizontalen Spannungsfeldes des Gesteins ist eine Vorzugsrichtung für Bohrlochwandausbrüche. Beim 6-armigen Kalibermessgerät werden meist 6 Messwerte unabhängig voneinander aufgenommen und damit die Bohrlochform wesentlich genauer erfasst.

5.3.2 Eigenpotenzial

Messparameter Elektrische Spannung (mV)

Beschreibung

Bei der Eigenpotenzialmessung wird die elektrische Spannung entlang des Bohrlochs aufgezeichnet. Elektrische Spannungen werden durch unterschiedliche Vorgänge hervorgerufen:

- Transport von Ionen infolge eines Konzentrationsgefälles (elektrochemische Komponente),
- Strömungspotenzial durch elektrisch wirksame Filterung beim Austausch zwischen Spülung und Grundwasser (elektrokinetische Komponente) und
- chemische Reaktionen (Reduktions- und Oxidationsvorgänge, sog. Redoxpotenziale), z. B. im Bereich sulfidischer Erzlagerstätten oder bei Graphiten.

An Grenzen zwischen zwei unterschiedlichen Gesteinen werden Spannungsdifferenzen gemessen. Am besten lassen sich Schichtgrenzen zwischen signifikant unterschiedlichen Sedimenten, z. B. zwischen tonigen und sandigen Sedimenten, bestimmen. Die Eigenpotenzialmessung erlaubt zudem eine schnelle Bestimmung der Schichtgrenzen zwischen wasserführenden (Aquifer) und wasserstauenden Schichten und können beispielsweise zur Abgrenzung des Filterbereiches in Grundwasserbrunnen genutzt werden.

Messprinzip

Im unverrohrten Bohrloch wird das elektrische Potenzial zwischen einer Referenzelektrode an der Oberfläche und einer eingebrachten, frei beweglichen Messelektrode registriert. Die Messung erfolgt beim Ausfahren der Messelektrode. Eigenpotenzialmessungen werden als Relativmessungen ausgeführt.

5.3.3 Gamma-Messung

Messparameter Gamma-Strahlung [Bq]

Messziel

Die Gamma-Messung erlaubt Rückschlüsse auf die Gesteinsart bzw. den Tongehalt.

Beschreibung

Es wird die natürliche Strahlung des Gebirges gemessen, die durch Kalium (⁴⁰K), Uranium (²³⁸U) und Thorium (²³²Th) bzw. deren radioaktive Zerfallsprodukte hervorgerufen wird. Gemessen werden die Ereignisse pro Zeiteinheit (1 Bq = 1 s⁻¹). Die Messkurven werden skaliert in den API-Standardmaßen, die auf eine international vereinbarte Kalibrierung zurückzuführen sind. In Tabelle 5-5 ist die Gammaaktivität einiger Minerale in API-Einheiten angegeben. Bei Sedimentgesteinen nimmt in der Tendenz die Radioaktivität von tonfreien zu tonhaltigen Gesteinen zu. Sand- und Kalksteine sowie humose, tonfreie Lagen (Braunkohlen) weisen praktisch keine Gammastrahlung auf.

Tabelle 5-5: U-, Th- und K-Gehalte einiger Minerale sowie Wertebereiche der Gamma-Aktivität in API-Einheiten (Fricke & Schön 1999)

Mineral	U-Gehalt [ppm]	Th-Gehalt [ppm]	K-Gehalt [%]	Gammaaktivität [API]
<i>Ton (Mittelwert)</i>				80 - 150
Montmorillonit	2 - 5	14 - 24	0 - 4,9	150 - 200
Bentonit	10 - 36	4 - 55		
Chlorit		3 - 5	0 - 0,35	180 - 250
Kaolinit	1,5 - 9	6 - 42	0 - 0,6	80 - 130
Illit	1,5	10 - 25	3,5 - 8,3	250 - 300
Glaukonit		< 10	3,2 - 5,8	
<i>Glimmer</i>				270
Biotit	1 - 40	0,5 - 50	6,2 - 10,1	
Muskovit	2 - 8	10 - 25	7,9 - 9,8	
<i>Alkalifeldspäte</i>				220
Mikroclin		< 0,01	10,9	
Orthoklas		< 0,01	11,8 - 14	
<i>Plagioklase</i>				0
Albit - Anorthit	0,2 - 5	0,5 - 3		
<i>Quarz, Dolomit, Kalzit</i>				0
<i>reine Sandsteine</i>				15

Messprinzip

Die Gamma-Messung kann in offenen und verrohrten Bohrungen erfolgen. Die Brauchbarkeit der Messung hängt ganz wesentlich von der Fahrgeschwindigkeit der Sonde ab, sie sollte 4 m/min nicht überschreiten.

Auswertung

Die Abschätzung des Tongehaltes aus dem Gamma-Ray Index (GRI) wird auf der Grundlage des Zusammenhangs zwischen Tongehalt und natürlicher Aktivität durchgeführt. Zur Umrechnung des Gamma-Logs in diesen Index wird jeweils ein Minimalwert für reine Sandsteine (möglichst Quarzsandsteine) und ein Maximalwert für reine Tone bzw. Tonsteine für die jeweilige Bohrung definiert und der Gamma-Ray Index (GRI) standardmäßig nach (Gleichung 1) berechnet:

$$GRI = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\min} - GR_{\max}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

mit

GR	gemessene Gammastrahlung
GR_{\min}	Messwerte von GR in tonfreien Gesteinen
GR_{\max}	Messwerte von GR in reinen Tonsteinen

5.3.4 Gamma-Spektrometrie

Messparameter Gamma-Strahlung [Bq]

Messziel

Die Gammastrahlung wird innerhalb von drei diskreten Energiefenstern gemessen, die die ^{40}K -, ^{238}U - und ^{232}Th -Peaks im Gamma-Spektrum abdecken, so dass die genauen Konzentrationen dieser Elemente bestimmt werden können. Das Th/K-Verhältnis ermöglicht eine Aussage über die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine, deren Sedimentationsbedingungen und über diagenetische Veränderungen. Die Abbildung 5-1 zeigt eine Bestimmung von Mineralien anhand des Verhältnisses Thorium zu Kalium.

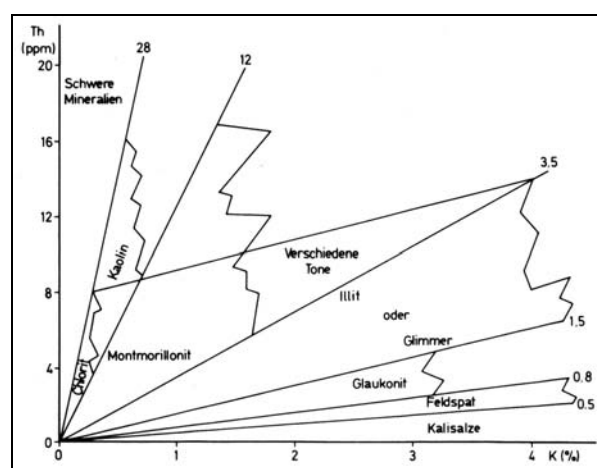


Abbildung 5-1: Bestimmung von Mineralien in Sedimenten durch das Verhältnis von Thorium zu Kalium (Bender 1985)

5.3.5 Gamma-Spectrometer Tool

Messparameter Gamma-Strahlung [Bq]

Messziel

Mineralische Zusammensetzung der Gesteine, Porosität

Messprinzip

Das *Gamma Spectrometer Tool* misst die induzierte Gamma-Rückstrahlung, die bei der Wechselwirkung der Atome mit Neutronen hoher Energie entsteht. Aus der Spektralanalyse in zwei Aktivierungsbereichen, inelastische Streuung und Einfangreaktion, können Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung der Minerale gezogen werden. Darüber hinaus ist eine Aussage zur Porosität möglich, da das System auch auf die Wasserstoffkonzentration anspricht.

5.3.6 Neutron-Aktivierungsmessung

Messparameter Gamma-Strahlung [Bq]

Messziel

Aussagen über den Wassergehalt und die Porosität der Schichten

Messprinzip

Das Gestein wird mittels einer Neutronenquelle bestrahlt und damit im Gestein bei entsprechenden Elementen eine „induzierte Radioaktivität“ erzeugt. Mit einem Gammadetektor wird die Strahlungsintensität der zerfallenden Isotope gemessen.

5.3.7 Neutron-Neutron-Messung

Bei Neutron-Sonden werden Neutronen in die Formation ausgesendet. Die Neutronen werden durch Zusammenstöße mit den Atomkernen abgebremst unter gleichzeitiger Verringerung des Energieniveaus. Bei der Abbremsung der Neutronen wird Gammastrahlung erzeugt. Zum Einsatz kommen künstliche (Beschleuniger), natürliche (Americium-Beryllium) und elektrische Neutronenquellen. Die künstliche Neutronenquelle hat messtechnische Vorteile gegenüber der natürlichen Quelle, da die erzeugten Neutronen epithermische Neutronen sind, d. h. sie weisen ein höheres Energieniveau (0,1 – 1 eV) auf als die thermischen Neutronen (0,025 – 0,1 eV), die von einer Americium-Beryllium-Quelle erzeugt werden. Haben die Neutronen schließlich das sog. thermische Energieniveau (ca. 0,025 eV) erreicht, werden sie von anderen Atomkernen eingefangen, die dadurch zum Aussenden eines Gammaquants hoher Energie angeregt werden.

Die Neutronen erfahren den größten Energieverlust beim Zusammenstoß mit dem Wasserstoffatom, da die Masse des Protons nahezu gleich der des Neutrons ist. Daher reagiert das

Messsystem auf die Wasserstoffkonzentration im Gebirge. Die „Wasserstoffdichte“ für Wasser errechnet sich aus

$$P_{\text{Wasser}} \cdot 2H / (2H + O) = 1 \cdot 2 / (2 + 16) = 1/9$$

Der Wasserstoffindex für Wasser kann als Referenzwert benutzt werden und wird im Allgemeinen gleich eins gesetzt.

Die Wasserstoffkonzentration kann bei vollständiger Wassersättigung in tonfreiem Gebirge als Funktion der Porosität beschrieben werden. Tonstein und Schluff weisen infolge des gebundenen Wassers einen Wasserstoffindex in der Größenordnung von 0,1 – 0,4 auf. In Sand-Schluff-Ton-Profilen zeigen Gamma-Gamma-Log und Neutron-Log bei der Darstellung der Impulsraten häufig einen gegensinnigen Verlauf. Der Wasserstoffindex HI (hydrogen index) verschiedener Gesteinsbestandteile ist in der Tabelle 5-6 dargestellt.

Tabelle 5-6: Wasserstoffindex HI (hydrogen index) verschiedener Gesteinsbestandteile (Fricke & Schön 1999)

Gesteinskomponente	HI	Gesteinskomponente	HI
Wasser	1	Ton – Schluff (Wertebereich)	0,1 – 0,4
Erdöl (mittlerer Wertebereich)	0,96 – 1,02	Kaolinit	0,37
Gas (Mittelwert, 93 °C, 48 MPa)	0,54	Chlorit	0,32
Quarz bzw. reine Sandsteine	0,02	Montmorillonit	0,17
Calzit	± 0	Illit	0,09
Dolomit	0,01		

5.3.8 Compensated Neutron Tool (CNT, Neutron-Gamma Log)

Das CNT misst mit einem Sensor die Gammastrahlung, verursacht durch die Abbremsung und die Einfangreaktion der thermischen Neutronen. Ein zweiter Sensor registriert die normale Gammastrahlung, die in Abzug gebracht wird (compensated). Für integrierte Porositäts- und Lithologiemessungen (IPL) wird die sog. „Integrated Porosity and Lithology“-Sonde (IPL) eingesetzt, die in sich ein Gamma-Gamma-Log, ein Neutron-Log (mit künstlicher Neutronenquelle) und die Gammaskopmetrie vereinigt.

5.3.9 Neutron-Gamma Log

Die Pulsed Neutron Messung (Neutron Pulse and Decay) ist eine Weiterentwicklung der Neutronenmessung. Das Gebirge wird mit Neutronen hoher Energie (14 MeV) aus einer elektrischen Neutronenquelle bestrahlt. Dies erfolgt in sich schnell wiederholenden Pulsen. Die in der Formation emittierten Neutronen werden abgebremst; beim Erreichen thermischer Energie (ca. 0,025 eV) wird die Neutronenpopulation durch Einfangreaktionen vermindert. Die Neutronenpopulation im thermischen Energieniveau wird zwischen den Pulsen gemes-

sen und der zeitliche Verlauf des Abklingsignals bzw. die Zerfallsrate berechnet. Die Messung der Abbauphase der thermalen Neutronenpopulation gibt Informationen über die Konzentration von neutronabsorbierenden Elementen, wie z. B. Chlor. Diese Messung eignet sich sehr gut zur Bestimmung der Wassersättigung in öl- und gasführenden Sandsteinen, bei Tonsteinen mit höherem Wassergehalt steigt der Bestimmungsfehler an. Mit dem Neutron Pulse Decay – 100 Channel Analysator wird das gesamte Zerfallsspektrum in 100 Kanälen von je 10 µsec geteilt und gemessen.

5.3.9.1 Gamma-Gamma-Messung (Dichte-Log) und photoelektrische Faktor (PEF-Log)

Die Gamma-Gamma-Messung liefert Daten über die Dichte der einzelnen Gesteinsschichten. Sie werden benötigt

- für sedimentologische und mineralogische Aussagen,
- zur seismischen Interpretation und
- aus Gründen der technischen Sicherheit der Bohrung.

Der photoelektrische Faktor stellt in Kombination mit der Gamma-Gamma-Dichtemessung einen wichtigen Lithologie-Indikator dar, der für eine einfache Klassifizierung von Sedimentgesteinen dient.

Die Dichtebestimmung erfolgt mit Hilfe der Gamma-Gamma-Sonde. Bei Gamma-Gamma-Sonden werden Gammastrahlen durch eine ¹³⁷Cs-Quelle in die Formation ausgesendet. Gemessen wird die sekundäre Gamma-Rückstrahlung (Compton-Streuung). Die Menge der reflektierten Gammastrahlung ist proportional der Elektronendichte pro Volumeneinheit (ρ_e) der durchstrahlten Materie. Zur Matrixdichte (ρ_b) besteht folgende Beziehung:

$$\rho_b = 1,0704 \rho_e - 0,1883$$

mit ρ_e = Elektronendichte pro Einheitsvolumen.

Die Bestimmung der Gesteinsdichte ist verhältnismäßig genau. Die Dichte der Gesteinsmatrix von Sedimentgesteinen schwankt jedoch nur in sehr engen Grenzen (etwa zwischen 2,4 g/cm³ und 2,9 g/cm³) und hängt vornehmlich von der Porosität des Gesteines ab. Aus der Massendichte kann – in Kenntnis der festen Gesteinspartikel (der Matrixdichte) und der Dichte des Fluids, das den Porenraum füllt – die Porosität berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit die Porosität zu bestimmen stellt die Kombination des dichteempfindlichen Gamma-Gamma-Log mit dem porositätsempfindlichen Neutron-Log dar (BGR 1990). Die Tabelle 5-7 enthält Angaben zur Dichte und zum photoelektrischen Faktor von verschiedenen Sedimentgesteinen.

Tabelle 5-7: Dichte und photoelektrischer Faktor (Pe) von verschiedenen Sedimentgesteinen nach Fricke & Schön (1999) sowie Bender (1985).

Mineral / Porenhalt	Dichte (ρ_b) in [g/cm ³]	P _e in [Barns/Elektron]
Sandstein	2,65	1,8
Illit	2,6 – 2,8	3,4
Kaolinit	2,6 – 2,7	1,8
Kalzit (Kalkstein)	2,75	5,1
Chlorit	2,6 – 2,8	6,3
Montmorillonit	2,2 – 2,8	2,0 – 2,3
Salzwasser (120 mg/g)	1,1	0,8
Süßwasser	1,0	0,4
Erdöl	0,7 – 0,8	0,4
Methan	0,7	0,2

Der photoelektrische Faktor wird aus der Gamma-Rückstrahlung bestimmt. Hierbei wird mit einer niedrigerenergetischen Quelle (Energiebereich etwa 40 keV bis 120 keV) der Adsorptionskoeffizient P_e gemessen. Der photoelektrische-Absorptions-Index P_e ist der gesamte Prozess, der sich zur vollständigen Absorption der Gammastrahlung durch das Elektron abspielt und hängt ab von der Art der zu den Elektronen zugehörigen Atome, ist also gesteinsabhängig. Bei Abwesenheit seltener Mineralien ist der P_e-Index also ein Maß für die mittlere Elektronenzahl pro Atom und kann zur Differenzierung unterschiedlich zusammengesetzter Gesteinsarten nach ihrem Elementbestand eingesetzt werden. Der P_e-Index nimmt mit steigender Atomnummer (Z) zu:

$$P_e = (0,1 \times Z)^{3,6}$$

Die Einheit ist Barns/Elektron (= fm²/Elektron). Angaben zum photoelektrischen Faktor von verschiedenen Sedimentgesteinen sind in Tabelle 5-7 dargestellt.

5.3.9.2 Widerstands- und Leitfähigkeitsmessungen

Die Widerstands- und Leitfähigkeitsmessungen eignen sich hervorragend zur stratigraphischen Gliederung und lithologischen Bewertung einer durchteuften geologischen Abfolge, da viele Gesteine sich aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften voneinander unterscheiden lassen. Tone weisen einen niedrigen, Sande und Kiese dagegen in der Regel einen hohen spezifischen Widerstand auf. Für die Leitfähigkeit gilt dies entsprechend umgekehrt. Die Leitfähigkeitsmessung gibt auch Auskunft über die Menge und Zusammensetzung des im Gestein enthaltenen Wassers und damit über die Sättigung und die Porosität der aufgeschlossenen Gesteinsfolge. Gesteine ohne Poren oder Klüfte sind keine oder schlechte Leiter (z. B. Steinsalz, dichte Kalksteine). Auch Öl oder Gas im Porenraum leiten den Strom praktisch nicht, daher wird der Gesteinswiderstand bei Wasser in den Gesteinsporen immer niedriger, wenn die Salinität des Formationswassers zunimmt und das Porenvolumen sich

vergrößert. Tonsteine sind schwer zu detektieren, da sie auf der einen Seite nicht durchlässig sind, aber auf der anderen Seite mit Wasser gefüllte Porenräume besitzen.

Bei den elektromagnetischen Verfahren wird über zwei an einer Bohrlochsonde angeordnete Stromelektroden ein automatisch konstant gehaltener Strom ins Gebirge geleitet. Das dabei zwischen den Spannungselektroden anfallende Signal wird registriert. Es ist dem elektrischen Widerstand proportional und dient zur Ermittlung des Formationswiderstandes. Der elektrische Widerstand des Gebirges kann auch durch die Messung des Parameters der Leitfähigkeit bestimmt werden. Die Leitfähigkeit stellt den reziproken Wert des elektrischen Widerstandes dar. Die Messung erfolgt, indem von einer auf der Messsonde angebrachten Sendespule elektromagnetische Wellen (Frequenz ~ 20 kHz) in das umgebende Gebirge ausgestrahlt werden. Je nach Leitfähigkeit des Gebirges bilden sich dadurch mehr oder weniger starke Wirbelströme im Gebirge aus, deren magnetische Felder in einer Empfangsspule, die in einem Abstand von meist etwa 1 m auf der Messsonde angebracht ist, Spannungen induzieren. Aus der Amplitude und der Phasenlage dieser induzierten Spannung ergibt sich die Leitfähigkeit des Gebirges.

Häufig wird bei der Bohrlochgeophysik das Dual Laterolog (DLL), das Dual Induction Laterolog (DIL) und das Micro Spherically Focused Log (MSFL) eingesetzt. Für die Ermittlung der wahren Widerstände müssen Widerstandsmessungen mit unterschiedlichen "Eindringtiefen" eingesetzt werden. Hierdurch werden Korrekturen von störenden Einflüssen (Spülung, Filterkuchen und Invasions-, bzw. Infiltrationszonen) möglich.

Das Dual Laterolog (DLL) kann in leitender Spülung eingesetzt werden. Es kombiniert zwei Widerstandsmessgeräte mit großer und mittlerer Eindringtiefe. Das tief eindringende System mit der größeren Elektrodenentfernung liefert den spezifischen Gebirgswiderstand, ist in der Schichtauflösung aber merklich ungenauer. Das flach wirkende System ist relativ stark durch die Spülung und eventuell vorhandenen Spülungsinfiltrationen beeinflusst, besitzt aber wegen des kleineren Elektrodenabstandes eine relativ gute Schichtauflösung. Die Anwendung erfolgt hauptsächlich in Gesteinen mit hohen Formationswiderständen.

Das Dual Induction Laterolog (DIL) kombiniert 3 Widerstands- bzw. Leitfähigkeitsmessgeräte mit unterschiedlichen Eindringtiefen, die Laterolog-Methode für geringe und die Induktionslog-Methode für mittlere und geringe Eindringtiefen. Die Anwendung des DIL erfolgt in Gesteinen mit niedrigen Formationswiderständen und wenn sich eine nichtleitende (ölbasierte) Spülung im Bohrloch befindet.

Das Micro Spherically Focused Log (MSFL) zeichnet sich aufgrund der kleinen Elektrodenabstände durch ein sehr hohes Auflösungsvermögen aus, wodurch die Eindringtiefe jedoch auf maximal 5 cm reduziert wird. Die Messsonde liegt direkt an der Bohrlochwand an.

Die Mikrowiderstandsmessungen werden als qualitative Porositäts- und Durchlässigkeitssindikatoren genutzt. Aufgrund des hohen Auflösungsvermögens können mit dem MSFL sehr dünne Schichten und Inhomogenitäten, wie z. B. Störungen, Klüfte oder Zerrüttungszonen im Nahbereich identifiziert werden.

Mikrowiderstandsmesssysteme, wie z. B. die Diplog-Sonde und der Formation Micro Scanner, werden auch zur Strukturaufnahme eingesetzt. Sie detektieren Schichtgrenzen, Klüfte und andere kleinräumige Strukturelemente und erfassen ihre räumliche Lage (Neigung und Richtung bzw. den Einfallswinkel). Die Strukturmessungen werden auch im Rahmen von felsmechanischen Untersuchungen eingesetzt. Spannungsinduzierte Risse, Klüfte und Bohrlochrandausbrüche können damit sehr gut erfasst werden. An dieser Stelle ist im Zusammenhang mit Strukturmessungen auch ein optisches Bohrlochverfahren, der sogenannte Borehole Televiewer (Bohrlochfernsehen), und ein akustisches Bohrlochverfahren, der sogenannte Borehole Acoustic Televiewer, zu nennen. Der Einsatz des Borehole Televiewer ist aber durch das Vorhandensein einer transparenten Bohrspülung oder eines trockenen Bohrloches eingeschränkt.

Die Diplog-Sonde besteht aus 3 bis 4 Mikrowiderstandsmesssystemen, die auf einem Gleitschuh sitzend die Bohrlochwand abtasten. Beim Passieren einer Schichtgrenze wird von jedem einzelnen Messsystem eine Widerstandsänderung mit der entsprechenden Teufenlage angezeigt. Ist die Bohrlochachse senkrecht, ist es relativ einfach, den Einfallswinkel mittels trigonometrischer Formeln aus den 3 bzw. 4 Mikrowiderstandskurven zu errechnen. Das Schichteinfallen erfolgt jedoch in eine bestimmte Himmelsrichtung (senkrecht zur Streichrichtung) und die Bohrlochachse weicht im allgemeinen mehr oder weniger von der Senkrechten ab. Daher sind zusätzlich eine Neigungsmesseinrichtung (Pendel) und eine Orientierungsmesseinrichtung (Kompass, Kreisel) in der Sonde installiert, um die auf die Bohrlochachse und die willkürliche Lage der Sonde in der Bohrung bezogenen Werte für Fallwinkel und -richtung auf die tatsächliche Senkrechte bzw. auf geographisch Nord zu reduzieren. Die Neigungs- und Orientierungsmesseinrichtungen, die als Abweichungsteil der Sonde bezeichnet werden, können auch getrennt von der Dipmeter-Sonde gefahren werden. Sie liefern dann ein sogenanntes Abweichungslog, das nur der Erfassung der räumlichen Geometrie des Bohrlochverlaufes dient. Die vielfach eingesetzten sogenannten Single- und Multishot-Geräte erlauben eine punktweise Messung der Neigung und Orientierung.

Der Formation Micro Scanner stellt eine Weiterentwicklung des Dip-Log-Prinzips dar. Das Messsystem besteht aus zwei um 90° versetzten Elektrodenträgern mit je 27 Elektroden. Neigungs-, Orientierungs- und Kaliberdaten werden gleichzeitig aufgezeichnet. Nach einer Bildverarbeitung der gemessenen elektrischen Widerstandskurven erhält man eine nach N orientierte 360°-Abbildung der Bohrlochwand.

5.3.9.3 Messverfahren zur Bestimmung des Diagenesegrades der Schichtenfolge und der Tektonik

Das Akustik-Log dient zur Porositätsermittlung, zur Bestimmung der Laufzeiten seismischer Wellen im Gestein und zum Nachweis der Klüftung. Darüber hinaus kann der Diagenese- bzw. Verfestigungsgrad von Sedimentgesteinen durch Kombination mit dem Dichte-Log abgeschätzt werden.

Die Bohrlochseismik mittels Vertical Seismic Profiling (VPS) und Geophonversenkmessungen (GVM) ist das Bindeglied zwischen der an der Oberfläche aufgenommenen 2D/3D-

Seismik und den Sondierungsbohrungen. Mit Hilfe von seismischen Messungen können zudem aussagefähige quantitative Angaben zu dem Trennflächeninventar des Gebirges (Tektonik) gemacht werden.

Sonic-/Akustik-Log sowie Borehole Acoustic Televiewer

Mit dem Sonic-Log werden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten eines von einem Sender ausgestrahlten Schallimpulses über einen in der Länge konstanten Abschnitt der Bohrlochwand gemessen. Das eingehende Signal entspricht einer hochfrequenten seismischen P-Welle (Kompressionswelle) deren Geschwindigkeit (V_p) aus den registrierten Laufzeiten berechnet wird. Jedes Medium hat eine bestimmte Schallgeschwindigkeit, die von der Dichte und der Elastizität abhängig ist. Eine Änderung der Schallgeschwindigkeit deutet auf eine Änderung der Konstanten hin, beispielsweise des Porenvolumens. Eine derartige Messung ist daher grundsätzlich nur unter der Voraussetzung

$$V_{p, \text{Formation}} > V_{p, \text{Spülung}}$$

möglich. Dies führt vor allem im Lockergesteinsbereich zu Einschränkungen der Einsatzbarkeit, da hier die Geschwindigkeit in der Formation in der gleichen Größenordnung bzw. unter der Geschwindigkeit in der Spülung ist. Das Sonic-Log gibt damit eine Übersicht über die seismische Geschwindigkeitsverteilung entlang der Bohrlochachse. Sie ist ein empfindlicher Indikator für die Lithologie und – bei gleichbleibender Gesteinsmatrix – für die Porosität der durchteuften Formation. Für tonhaltige Sedimente erscheint die Sonic-Porosität höher als die eigentliche Formationsporosität auf Grund der höheren Laufzeiten in Tonen und Tonsteinen. Um hierfür einen Korrekturwert zu erhalten, muss der Volumenanteil an Tonstein (V_{SH}) in der Formation durch Auswertung der Gamma-Ray-Messungen bestimmt werden.

Durch Aufsummieren der registrierten Laufzeiten kann eine Laufzeit-Tiefenfunktion berechnet werden. Diese detaillierte Laufzeit-Tiefenfunktion des Sonic-Signals bildet zusammen mit den Ergebnissen der Geophon-Versenkmessung die Grundlage für die Zeit-Tiefen-Umrechnung der reflexionsseismischen Daten.

Die analogen oder digitalen Aufzeichnungen der Sonic-Wellenzüge erlauben außer der Auswertung der P-Welleneinsätze auch eine Analyse der S-Welleneinsätze. Mit der Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeit sowie mit der Dichte, gewonnen aus der Gamma-Gamma-Messung, können die elastischen Parameter (Kompressionsmodul, Schermodul, Young's-Modul und Poissonverhältnis) berechnet werden. Darüber hinaus dient das Sonic-Log zur Früherkennung von Hochdruckzonen, der Kluffcharakterisierung und zur Durchlässigkeitsbestimmung. Synthetische Seismogramme unterstützen die seismischen Befunde. Sie werden aus den editierten Dichte- und dem kalibrierten Sonic-Log errechnet.

Nach dem gleichem Prinzip des Sonic-Logs arbeitet der Borehole Acoustic Televiewer (BHTV). Er wird eingesetzt um tektonische Messungen durchzuführen. Er tastet die Bohrlochwand spiralförmig mit einem rotierenden akustischen Strahl ab. Die Amplitude der reflektierten Schallwelle gibt Rückschlüsse auf die Beschaffenheit und das Kaliber des Bohrloches. Nach der Auswertung können über eine dreidimensionale Darstellung der Bohrlochwand Strukturelemente wie Klüfte, Wandausbrüche und z. T. sogar die Grobtextur

des untersuchten Bohrlochabschnittes erkannt werden. In Bohrungen mit schwerer Spülung ($> 1,4 \text{ g/cm}^3$) oder zu großem Durchmesser kann das Gerät aufgrund der zu starken Signaldämpfung nicht eingesetzt werden.

Vertical Seismic Profiling (VSP)

Das VSP bietet die Möglichkeit des direkten Vergleichs zwischen den reflexionsseismischen Daten und den Bohrloch-Logs. Im Bohrloch gemessene seismische Geschwindigkeiten sind viel genauer und zuverlässiger als die aus den seismischen Oberflächenmessungen direkt abgeleiteten Stapelgeschwindigkeiten. Es wird versucht, hoch auflösende Informationen im Bereich der Bohrung zu erhalten und die Extrapolation der Bohrlochergebnisse auf den gesamten seismischen Datensatz zu erleichtern. Die seismischen Geschwindigkeiten (Schalllaufzeiten) können zusätzlich im Labor an Bohrkernen bestimmt werden.

Bei diesem geophysikalischen Bohrlochverfahren werden seismische Empfänger (Geophone oder Hydrophone) in eine Bohrung auf zuvor definierten Positionen eingebracht. Anschließend werden seismische Signale an der Erdoberfläche in verschiedenen Abständen und/oder Richtungen von der Bohrung mit Sprengstoff, Luftpulser oder Vibroseis-Verfahren erzeugt. Die Mehrfachregistrierung des gleichen Wellenzuges wirkt bei der Auswertung von V_S -, V_P - und Stoneley-Wellen-Messungen (letztere dienen zur Lokalisierung von Zerrüttungszonen) besonders positiv aus. Darüber hinaus können die Multiplen identifiziert, die wahren Amplituden ermittelt und somit die Dämpfungskennwerte berechnet werden. Erst die Kenntnis dieser Größen ermöglicht die zuverlässige Deutung reflexionsseismischer Messungen.

Geophonversenkmessung (GVM)

Geophonversenkmessungen dienen zur Bestimmung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung im Gebirge. In der Bohrung werden in verschiedenen Teufen triaxiale Einzelgeophone oder Geophonketten installiert. Daraufhin erfolgt an der Oberfläche die Erzeugung von Schallimpulsen (z. B. durch Sprengstoff). Der direkte, abwärtsgehende und reflektierte Impuls wird von den Geophonen aufgenommen und aus dem registrierten Wellenzug kann die seismische Laufzeit und Geschwindigkeit als Funktion der Tiefe ermittelt werden.

5.3.9.4 Methoden zur Interpretation von bohrlochgeophysikalischen Messungen

Die am häufigsten angewandten Methoden zur Interpretation von bohrlochgeophysikalischen Messungen sind

- die Composite Logs und
- die Crossplots.

Das Composite Log (oder Messdiagramm) ist eine graphische Gegenüberstellung von Bohrlochmesskurven. Anhand der Composite Logs findet eine visuelle, vergleichende Analyse charakteristischer Kurvenformen statt. Bei den Crossplot-Verfahren werden Messwerte gleicher Bohrungstiefe von unterschiedlichen Verfahren abgegriffen und in ein Koordinatensystem eingetragen, dessen Achsen durch die Parameter der gewählten Bohrloch-

messungen aufgespannt werden. Werden im einfachsten Fall zwei Messverfahren gegenübergestellt, spricht man von einem X-Y-Plot. Mit der Einbeziehung der Werte eines zusätzlichen Verfahrens durch unterschiedliche Signaturen oder Farben im zweidimensionalen Plot erhält man ein Z-Plot als quasi dreidimensionale Darstellung. Diese Darstellung ermöglicht die petrophysikalischen Größen einzelner Schichten quantitativ abzuschätzen.

Die Analyse des Composite-Logs im Zusammenhang mit der geologischen Erstsprache zeigt, dass der überwiegende Teil der Bohrlochmessungen eine eindeutige lithologisch-mineralogische Differenzierung der Schichtenfolge nicht zulässt. Eine stärkere Gliederung der Schichtenfolge kann nur durch eine Kombination der einzelnen Bohrlochmessungen zu den sogenannten Crossplots erfolgen. Die Anwendung der Crossplot-Methode in Sedimentgesteinen ist in der Erdölindustrie sehr gebräuchlich. Bei der Crossplot-Methode lassen sich Gesetzmäßigkeiten zwischen unterschiedlichen Messgrößen nachweisen, die zwischen petrophysikalischen Größen bestehen und sich statistisch abbilden.

Eine weitere Möglichkeit geologische Formationen zu charakterisieren ist die Kombination von Bohrlochmessungen mit seismischen Daten.

5.3.10 Vertikales und radiales Auflösungsvermögen der einzelnen Bohrlochmessverfahren

Inwieweit geophysikalische Bohrlochmessungen zur Beurteilung der räumlichen Ausdehnung von Gesteinsschichten mit gleichen mineralogischen und physikalischen Eigenschaften (Homogenbereiche) beitragen, hängt von der vertikalen und radialen Auflösung der Einzelschichten ab.

Das vertikale Auflösungsvermögen beschreibt die Fähigkeit eines Verfahrens, Schichten bzw. Bereiche mit einem bestimmten Kontrast der physikalischen Eigenschaften voneinander exakt abzugrenzen und ihre Lage teufenmäßig zu bestimmen. Da die vertikale Auflösung nur im dm-Bereich liegt (siehe Tabelle 5-8), schränkt sie die Interpretation der Messdaten ein. Die begrenzte Vertikalauflösung der Messsonde bewirkt i.a. einen Integrationseffekt (Mittelwertbildung). Dem steht als Kontrast der ins mikroskopische Detail reichende Informationsinhalt der Bohrkerne gegenüber. Aus diesem Grund ist die Korrelation oft sehr problematisch, da auch die teufengerechte Zuordnung des Logs und des Bohrkerns mit unterschiedlichen Messverfahren ermittelt wird. Die Messteufe kann bei den geophysikalischen Logs z. B. durch Kabelstreckung beeinflusst sein. Bei der Teufe der Verrohrung können additive Fehler beim Verschrauben der Rohre auftreten. Zur Lösung des Problems wird bei der Bohrungen der Erdöl-Erdgas-Exploration eine Korrelation zwischen den Kernen und den Bohrlochmessungen an geologischen Markerhorizonten vorgenommen. Z. B. wird das gemessene Gamma-Ray-Log mit Gamma-Ray-Messungen am Kern verglichen. Darüber hinaus ist das vertikale Auflösungsvermögen stark von der Sondenfahrsgeschwindigkeit abhängig. Bei Routinemessungen mit Sondenfahrsgeschwindigkeit von 4 – 6 m/min beträgt es z. B. bei Gammamessverfahren 15 – 30 cm. Bei extrem geringen Sondenfahrsgeschwindigkeiten kann das Auflösungsvermögen der Einzelschichten durch Stapelung von Mehrfachmessungen bis auf etwa 10 cm verbessert werden.

Die radiale Eindringtiefe ist definiert als der zylindrische Bereich, aus dem 90 % des Formationssignals kommt und die als radiale Entfernung von der Bohrlochwand angegeben wird. Sie ist neben den Konstruktionsmerkmalen der Sonden auch sehr stark von der Bohrlochbeschaffenheit und von der Lithologie abhängig.

In Tabelle 5-8 sind die wichtigsten geophysikalischen Bohrlochmessverfahren in sedimentären Ablagerungen mit den radialen Eindringtiefen des Signals aufgelistet. In der Spalte Anmerkung sind Einflussfaktoren auf die Eindringtiefe angegeben. Als Randbedingungen sind für die Angaben in NLfB (1986a) vorgegeben:

- ein Bohrllochdurchmesser von 8½ " (216 mm),
- eine konventionelle Wasserspülung,
- ein homogenes Sedimentgebirge mit niedriger Effektivporosität,
- ein Sondendurchmesser von 3½ " (89 mm) und
- dass die Sonde an Bohrlochwand anliegt bzw. beim Sonic Log zentriert ist.

Tabelle 5-8: Mittlere radiale Signaleindringtiefe für sedimentäre Ablagerungen nach NLfB (1986a) und Fricke & Schön (1999)

Messmethode/-gerät	Radiale Eindringtiefe* (r) (m)	Vertikales Auflösungsvermögen** (m)	Anmerkung
Elektrische Messverfahren			
Potenzialmessung (SP-Log)	k.A.	1,5	-
Elektromagnetische Messverfahren			
Dual Laterolog (DLL) / Micro Spherically Focussed Log (MSFL)	$4-7 \cdot 10^{-2}$	$6,0 - 7,5 \cdot 10^{-1}$ / $1,0-3,0 \cdot 10^{-1}$	(zwei Messbereiche)
Laterolog (Messung während des Bohrvorganges)	$1 \cdot 10^{-1}$	-	r = f (Porosität, SW, RMA, RMUD)
Formation Micro Scanner Tool (FMST)	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	r = f (Porosität, RHOB, SW)
Compensated Neutron Tool, Neutron-Thermal Neutron Log (CNT)	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$4,6 - 6,0 \cdot 10^{-1}$	r = f (HKONZ, Porosität, RHOB)
Radioaktive Verfahren			
Gamma-Ray Log (GR)	$1,3 \cdot 10^{-1}$ / $1,5 - 2,0 \cdot 10^{-1}$ 1**	$2,0-3,0 \cdot 10^{-1}$	r = f (Porosität, RHOB, RKONZ)
Natural Gamma Spectrometer (NGS)	$1,7 \cdot 10^{-1}$		r = f (RHOB, RKONZ)
Gamma-Gamma-Log (LDT, Litho Density Tool)	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$4,6 - 6,0 \cdot 10^{-1}$	r = f (Porosität, RHOB, SW)
Gamma Spectrometer Tool (GST)	k.A.	k.A.	

Messmethode/-gerät	Radiale Eindringtiefe* (r) (m)	Vertikales Auflösungsvermögen** (m)	Anmerkung
Neutron Pulse Decay – 100 Channel Analysator (PDK-100)	$3 \cdot 10^{-1}$	-	r = f (HKONZ, SIG, RHOB) in zwei Spektralbereichen
PEF-Log	k.A.	$4,6 \cdot 10^{-1}$	-
Seismo-akustische Verfahren			
Akustik-Log; Borehole Compensated Sonic (BHC)	ca. bis 10^{-1}	$6,0 \cdot 10^{-1}$	r = f (Porosität, SW, RHOB, F, WM)
Borehole Acoustic Televiewer (BHTV)	-	-	Optisches Verfahren
Seismic Acquisition Tool (SAT) Triaxiale Geophonkette	$10^3 - 5 \cdot 10^3$	k.A.	r = f (Anregungsenergie, F)
Spannungs- und Deformationsmessungen			
Hydrofrac-Versuche	bis 10^2	-	r = f (PEF, PHIS, PFRAC)
Dilatometerversuch			

*: NLFb (1986a)

** : Fricke & Schön (1999)

Abkürzungen:

F	=	Senderfrequenz und frequenzabhängiger Gütefaktor
HKONZ	=	Wasserstoffkonzentration
PEF	=	Effektivdruck
PHIS	=	Sekundärporosität
PFRAC	=	Frac-Druck
RHOB	=	Massendichte, Gesamtdichte
RMA	=	elektrische Widerstand der Gesteinsmatrix
RMUD	=	Spülungswiderstand
SIG	=	Neutronen Einfangquerschnitt
SW	=	Wassersättigung
WM	=	Wellenmodus (P-, S- oder geführte Wellen)

Aus der Tabelle 5-8 geht hervor, dass die seismischen und geomechanischen Verfahren die höchste Eindringtiefe zeigen. Die anderen Messverfahren erschließen radial nur einige dm der Formation. Die ersten cm des Bohrloches sind jedoch durch den Bohrvorgang mechanisch und durch die Infiltration der Bohrlochspülung am stärksten geschädigt, so dass Korrekturen der Messwerte unerlässlich sind. Die Messwerte müssen durch geotechnische Untersuchungen bei der untertägigen Erkundung überprüft werden. Eine räumliche Analyse zur Homogenität von Ton- und Siltstein-Folgen ist nur durch die Korrelation der Bohrlochmessverfahren mehrerer Bohrungen an einem Normalprofil möglich.

Hohe, radiale Eindringtiefen von mehr als 100 m leistet zudem die Bohrlochgravimetrie, die über Relativmessungen der Schwerebeschleunigung Informationen über die Gesteinsdichte liefert. Sie findet bei der geotechnischen Prospektion von Fest- und Lockergesteinen praktisch keine Anwendung, da die Dichtunterschiede oft zu gering sind.

5.4 Geophysikalische Methoden

Durch sichtbare Aufschlüsse und Bohrungen sowie durch geophysikalische Bohrlochmessungen werden Punktinformationen gewonnen. Eine Einschätzung darüber, ob die Punktinformationen alle sicherheitsrelevanten Phänomene widerspiegeln, ist nicht möglich. Daher sind geophysikalische Messungen sehr nützlich, denn sie können flächenhafte oder räumliche Informationen liefern und ermöglichen damit die räumliche Beschreibung des Untersuchungsgebiets. Allerdings kann nicht ganz auf die intrusiven Bohrungen oder Aufschlüsse verzichtet werden, denn sie werden für die Auswertung geophysikalischer Messergebnisse oder als Messort benötigt.

5.4.1 Seismik

Seismische Messungen können zu mehreren Zwecken eingesetzt werden:

- Bewertung der seismischen Aktivität am Standort,
- Ermittlung der räumlichen Verteilung der Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen im Nahbereich von Schächten als Eingangsparameter für Standsicherheitsnachweise bei seismischen Einwirkungen,
- Erkundung des geologischen Aufbaus am Standort: Lage, Teufe, Neigung der unterschiedlichen Gesteinsschichten sowie eventuell vorhandener Störungssysteme
- Ermittlung dynamischer Parameter: Elastizitätsmodul und Poissonzahl
- Registrierung von Änderungen der Endlagerstruktur.

Seismische Messungen lassen sich für die zerstörungsfreie überörtige Standorterkundung und Überwachung einsetzen genauso wie unter Tage.

5.4.1.1 Oberflächen-, Reflexions- und Refraktionsseismik

Die Oberflächen-, Reflexions- und Refraktionsseismik wird häufig für die überörtige Erkundung des geologischen Aufbaus verwendet. Die Methoden sind weitgehend zerstörungsfrei und lassen die Bestimmung der Lage, Teufe und Neigung von relevanten Gesteinsschichten sowie Störungssystemen zu. Es werden drei verschiedene seismische Erkundungsmethoden unterschieden: die Reflexionsseismik, die Refraktionsseismik sowie die Oberflächenseismik. Bei allen drei Methoden werden an der Erdoberfläche oder in Bohrungen künstliche Erschütterungen erzeugt und dadurch seismische Wellen (Kompressions-, Scher- oder Oberflächenwellen) ausgelöst, die sich im Untergrund ausbreiten, wobei sie an Diskontinuitäten Brechung und Reflexion erfahren. Anschließend werden die seismischen Wellen mit Seismographen (Seismometern, Geophonen) registriert. Das wesentliche Ergebnis seismischer Messungen sind Schichtgrenzen im Untergrund, deren stratigraphische oder strukturgeologische Einordnung nur mit Hilfe geologischer Vorkenntnisse möglich ist.

Oberflächenseismik

Bei der Oberflächenseismik wird die an der Oberfläche entlangleitende seismische Welle registriert. Die Oberflächenseismik ist aufgrund der geringen Eindringtiefe nicht für Aussagen zur Ausbildung des Untergrundes in Tiefen von größer als 300 m geeignet und ist daher für die Oberflächenerkundung von tiefen geologischen Endlagern nur eingeschränkt einsetzbar.

Reflexions- und Refraktionsseismik

In der Reflexions- und Refraktionsseismik werden Raumwellen aufgezeichnet, die an Grenzschichten im Untergrund reflektiert wurden. Voraussetzung für diese Methode ist ein signifikanter Impedanzunterschied der Gesteinsabfolge im Untergrund. Unter Impedanz ($\rho \cdot v$) werden die beiden Effekte, die sich auf die Ausbreitung seismischer Wellen im Untergrund auswirken (Wellengeschwindigkeit v und Gesteinsdichte ρ), zusammengefasst. Die Wellengeschwindigkeit v hängt von der Art der Welle sowie von den Eigenschaften des Untergrundes ab:

Kompressionswelle (P-Welle, Longitudinalwelle)	$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
Scherwelle (S-Welle, Transversalwelle)	$v_s = \sqrt{\frac{G_{max}}{\rho}}$

mit E : Elastizitätsmodul [Pa]
 ρ : Dichte des Gesteins [kg/m³]
 G : Schermodul des Gesteins [Pa]

Kompressionswellen weisen im Vergleich zu Scherwellen eine höhere Geschwindigkeit auf.

Am häufigsten kommt die Reflexionsseismik zum Einsatz, die sich durch eine niedrige Strahlenablenkung und dadurch hohe räumliche Auflösung und Lagegenauigkeit auszeichnet. Die Eindringtiefe des Verfahrens liegt bei einigen 10er Kilometern. Eine abtauchende Welle trifft unter einem bestimmten Winkel auf eine Grenzschicht, wird direkt reflektiert und taucht unter demselben Winkel wieder auf. Bei der Refraktionsseismik werden Wellen aufgezeichnet, die sich als Kopfwelle entlang von Grenzschichten fortgepflanzt haben und daher in größerer horizontaler Entfernung vom Anregungspunkt an der Oberfläche auftauchen als bei der Reflexionsseismik. Mit der Refraktionsseismik ist eine direkte Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v im Untergrund möglich.

In der hybriden Seismik werden die Ergebnisse der Refraktionsseismik mit denjenigen der Reflexionsseismik miteinander kombiniert, um die jeweiligen Unzulänglichkeiten der einen Methode durch die Vorteile der anderen zu kompensieren und damit geologische Strukturen besser erkunden zu können.

Bei guter Kenntnis der gesteinspezifischen Wellengeschwindigkeit v kann aus der Wellenlaufzeit die Tiefenlage der Grenzschicht, an der die Welle reflektiert wurde, bestimmt werden. Aus der Wellenamplitude (Intensität) des registrierten Signals können zusätzlich Kenntnisse

über den Impedanzkontrast gewonnen werden. Der Impedanzkontrast tritt jedoch nur unter bestimmten Bedingungen auf:

- die Neigung der Grenzschicht ist nicht zu steil,
- die Grenzschicht ist als ein scharfer und abrupter Übergang ausgebildet,
- ausreichende Mächtigkeit der Gesteinsschicht im Verhältnis zur Dauer des seismischen Signals.

Hinsichtlich der Identifizierung von möglicherweise hydraulisch wirksamen Störungen des Schichtenverbandes liegt das Auflösungsvermögen der 3D-Seismik derzeit bei 5 – 10 m.

In Sedimentfolgen liegen häufig allmähliche Übergänge oder an ausgedehnte Übergangszonen vor, an denen es zu komplexen Reflexionen kommen kann, die sich aus einer Anzahl von Einzelimpulsen zusammensetzen. Die Interpretation der seismischen Messung ist in diesem Fall häufig nur mit Hilfe von zusätzlichen geophysikalischen Bohrlochmessungen möglich, da die Differenzierung im seismischen Profil allein zu schwach ausgeprägt und daher nicht eindeutig ist. Zudem besteht in Sedimentgesteinen der Nachteil, dass Ton-, Silt- und Sandsteine ähnliche Wellengeschwindigkeiten aufweisen und dadurch die Unterscheidung in seismischen Profilen kaum möglich ist. Es ist ein erheblicher Forschungsaufwand zu betreiben, um eine räumliche Analyse von Ton- und Siltstein-Folgen durchzuführen sowie die geophysikalische Erkundungsmethodik zu verbessern (Hoth et al. 2005)

Ferner kann aus den gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten der Kompressionswelle (v_p) und Scherwelle (v_s) der dynamische Elastizitätsmodul E_{dyn} und die dynamische Poissonzahl ν_{dyn} über die folgende Beziehung berechnet werden:

$$E_{dyn} = \frac{v_s^2 \cdot \rho \cdot (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2}$$

$$\nu_{dyn} = \frac{v_p^2 - v_s^2}{2 \cdot (v_p^2 - v_s^2)}$$

mit:

E_{dyn} : Elastizitätsmodul [kPa]

ν_{dyn} : dynamische Poissonzahl [-]

ρ : Dichte des Gesteins [kg/m³]

v_p : Kompressionswellengeschwindigkeit [m/s]

v_s : Scherwellengeschwindigkeit [m/s]

Bei 2D-Messungen sind die Geophone in gleichen Abständen auf einer Linie angeordnet, so dass vertikale Profilschnitte des Untergrundes angefertigt werden können. Die Lage der Gesteinsschicht an einem beliebigen Punkt im Raum zwischen zwei Profillinien kann nur durch Interpolation der Profildaten bestimmt werden. Da die seismischen Profillinien meistens mehrere Kilometer auseinander liegen, können Detailuntersuchungen nur durch eine Verdichtung

des bestehenden Messnetzes oder Anwendung eines wesentlich aufwendigeren 3D-Messverfahrens gelinden.

Bei der 3D-Seismik werden an der Oberfläche Geophone in gleichmäßigen flächenhaften Rastern angeordnet, wobei das Untersuchungsgebiet in Streifen, die nacheinander seismisch vermessen werden, aufgeteilt wird. Dadurch ist es möglich, die Neigungen der Gesteinsschichten in allen Richtungen zu erfassen und ihre räumliche Position wiederzugeben. Um eine genaue Zuordnung der seismischen Reflexionen zu erhalten, erfolgt eine Kalibrierung der seismischen Signale in einer Bohrung durch das Vertical Seismic Profiling (VSP) und durch die Geophoneversenkung.

5.4.1.2 Mikroseismik und akustische Emission (AE)

In der Mikroakustik oder Mikroseismik wird die akustische Emission (AE), die bei Rissbildungen in Festkörpern, wie z. B. Gestein, entsteht, von Bohrlochsonden aufgenommen und untersucht. Hoch empfindliche piezokeramische Aufnehmer zeichnen akustische Emissionen im Frequenzbereich von **1 bis etwa 100 kHz** auf. Damit ist die Erfassung und räumliche Lagebeschreibung kleiner **Risse im cm-Bereich** möglich.

Die Mikroakustik eignet sich zur In-situ-Überwachung von Rissbildungen in Endlagern sowohl im Steinsalz als auch im kristallinen Gestein. Damit können z. B. Auflockerungszonen (d. h. Anhäufungen kleiner Risse), Zonen erhöhter Gebirgsspannungen und untertägige Hohlräume festgestellt und lokalisiert werden. Durch Schallemissionsmessungen lässt sich die räumliche Lage von bei hydraulischen Aufreißversuchen im Gestein (Hydrofrac) entstandenen Rissflächen und damit die Lage der kleinsten Hauptspannung zuverlässig bestimmen. Die Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik (GmuG) und das Institut für Gebirgsmechanik in Leipzig (IfG) haben zusammen eine Bohrlochsonde entwickelt, die neben der Risserzeugungseinheit auch alle notwendigen Schallemissionsaufnehmer enthält, so dass nur noch ein Bohrloch für die räumliche Beschreibung der Rissflächen erforderlich ist. Konventionelle Messanordnungen benötigen dazu vier separate Messbohrungen.

Flächenhafte mikroseismische Untersuchungen wurden beispielsweise zur Charakterisierung des Kontaktbereichs eines Abschlussbauwerks sowie zur Überwachung von thermomechanischen Langzeitexperimenten in der Asse eingesetzt.

Aktive Ultraschallprüfung

Mit der Anwendung von elastischen Wellen im Ultraschall- und im hörbaren Bereich (ca. 2 bis 200 kHz) werden Festgesteine, wie z. B. Steinsalz, Anhydrit und kristallines Gestein, oder auch Tonstein und Beton über Laufwege von einigen Dezimetern bis zu einigen hundert Metern untersucht.

Durchschallung

Mit Durchschallungsmessungen werden die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Kompressions- und Scherwellen sowie deren Schwächung in dem untersuchten Material bestimmt. Diese Messparameter reagieren sehr empfindlich auf Materialübergänge und Einschlüsse

anderer Gesteinsarten, Klüftigkeit und Auflockerungszonen. Die Messungen können sowohl von freien Oberflächen als auch von Bohrlöchern aus durchgeführt werden.

Tomographie

Eine Vielzahl von einzelnen Durchschallungsmessungen entlang verschiedener Laufwege ermöglicht die Konstruktion von tomographischen Schnittbildern, in denen die flächenhafte Verteilung von Messparametern wie der Schallgeschwindigkeit und der Schallschwächung wiedergegeben sind. Für eine tomographische Untersuchung ist die Messung über sehr viele Laufwege erforderlich.

Ultraschall-Reflexionsseismik (Sonar)

Besonders wenn der zu untersuchende Bereich nur von einer Seite oder durch nur ein Bohrloch zugänglich ist, werden Strukturen im Inneren mit Hilfe von Reflexionsmessungen erkundet (ähnlich den Impuls-Echo-Verfahren der Werkstoffprüfung, medizinischem Ultraschall oder dem Echolot). Hierbei wird ausgenutzt, dass (Ultra-)Schallwellen, die in das Material abgestrahlt werden, an Schichtgrenzen und anderen Inhomogenitäten reflektiert werden. Aus einer genügenden Anzahl von Einzelmessungen an verschiedenen Positionen können die Lage der reflektierenden Materialgrenzen und die Geschwindigkeiten der Kompressions- und der Scherwelle bestimmt werden. Im homogenen Gestein wie zum Beispiel Steinsalz lassen sich mit dieser Methode noch Tiefenbereiche bis zu etwa 100 Metern erkunden. Im Beton wurden bisher erfolgreiche Untersuchungen bis zu 70 cm Betondicke durchgeführt.

5.4.1.3 Geophone

Seismometer dienen der Umwandlung von Bodenbewegungen in analoge Spannungssignale. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Permanentmagneten und einer Spule. Bewegt sich der Boden unter Einwirkung einer seismischen Welle, bewegt sich der Magnet mit, während die Spule aufgrund ihrer Trägheit in ihrer Lage verbleibt. Die Relativbewegung zwischen Spule und magnetischem Feld des Magneten induziert eine Spannung.

Geophone ähneln in ihrem Aufbau sehr den Seismometern. Sie werden zur Aufnahme kurzperiodischer sprengseismischer Signale eingesetzt. Für die Ortung von seismischen Ereignissen werden mehrere Geophone in einem bestimmten Messprofil äquidistant in den Boden gesteckt. Die bloße Registrierung eines seismischen Ereignisses ist mit einem einzigen 1D-Geophon möglich.

In der Praxis der angewandten Seismik werden heute fast ausschließlich diese Tauchspulgeophone verwendet. Entscheidender Parameter zur Beurteilung der Geophonqualität ist seine Übertragungscharakteristik, welche durch Eigenfrequenz, Empfindlichkeit und Dämpfungseigenschaften festgelegt wird.

5.4.1.4 Seismische Messungen im Endlager

5.4.1.4.1 Beobachtung der Auflockerung von Salzstein

Bei der Auffahrung von Strecken in einem Endlagerbergwerk wird der vorliegende Gleichgewichtszustand gestört und in der nahen Umgebung der geschaffenen Hohlräume bildet sich eine Auflockerungszone. Außerdem kann es im Endlager durch verschiedene Prozesse zu Gasentwicklung kommen:

- Zersetzung organischer Substanzen,
- Korrosion (chemische Reaktionen zwischen Feuchtigkeit und metallischen Komponenten),
- Radiolyse (Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff unter Einwirkung ionisierender Strahlung).

Durch die Prozesse der Gasbildung und der Konvergenz kann der Innendruck in einem unterirdischen Hohlraum oder in der Auflockerungszone ansteigen und die minimale Hauptspannung im Gebirge überschreiten (Überschreiten des Gebirgsdrucks), so dass es zu einer Rissbildung im Salzgebirge kommt, die durch die mechanische Störung möglicherweise bereits induzierte Auflockerung verstärkt. Ein solcher gasdruckinduzierter Riss ist mit entsprechender Schallemissionsaktivität verbunden, die sich durch die automatische In-situ-Schallemissionsmessungen orten lässt (Manthei 2007).

5.4.1.4.2 Überwachung der Gebirgsintegrität durch Mikroseismik

Während im Steinsalz durch Konvergenz erhöhte Gebirgsspannungen abgebaut werden, kommt es in den steiferen und festeren Anhydritschichten zu Belastungserhöhungen durch Spannungsumlagerungen, die zu Auflockerungen oder Rissbildungen, verbunden mit dem Auftreten mikroseismischer Ereignisse, führen können. Vorhandene Klüfte oder neugebildete Risse können zu Fließpfaden für Laugen werden, die Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Endlagers nehmen. Als ein mögliches Verfahren zur Beurteilung der Barriereintegrität des Wirtsgesteins bieten sich Schallemissionsmessungen an, die Aussagen über die Lokation von Störzonen erlauben.

Beispielsweise wurde in dem Salzbergwerk Bernburg ein mikroseismisches Messnetz zur Überwachung der durch die Abbautätigkeit hervorgerufenen Prozesse im Anhydrit eingerichtet. Das Messnetz besteht aus 16 Dreikomponenten-Beschleunigungsaufnehmern, wovon vier im Anhydrit und 12 im darüber liegenden Steinsalz angebracht wurden, und deckt einen Bereich von 160 x 160 x 100 m ab. Mittels Kupferkabeln wurden die Messsignale von den Sensoren zur Messwerterfassung übertragen. Die Messung wurde über 3 Jahre durchgeführt. Dabei wurden im Monat durchschnittlich 10.000 Ereignisse registriert, wovon 30 % automatisch geortet wurden.

Bei der Auswertung der Messsignale besteht das Problem, dass sie zum großen Teil durch den Grubenbetrieb hervorgerufen wurden und nicht durch echte seismische Ereignisse. Da-

her konnten nur die während der Betriebsruhe (Wochenende, schichtfreie Stunden) aufgezeichneten Messsignale ausgewertet werden.

Die Messungen im Salzbergwerk Bernburg haben gezeigt, dass mikroseismische Ereignisse bevorzugt auf die Aktivierung vorhandener Klüfte zurückzuführen sind, während die Bildung von Mikrorissen in vorher intakten Bereichen des Anhydrits eine untergeordnete Rolle spielt.

5.4.2 Georadar

Georadarmessungen lassen sich zu folgenden Zwecken einsetzen:

- Erkundung oberflächennaher Strukturen wie Hohlräume, Feuchtezonen, geologische Schichten,
- Ortung von Kabeln, Leitungen, Rohren, Fundamenten,
- geologische Erkundung im Vorfeld bergmännischer Arbeiten,
- Konstruktion eines räumlichen Modells der geologischen Strukturen,
- Detektierung der Ausbreitung von Injektionsmitteln (z. B. Injektionen zur Befestigung der Firste oder zur Unterbindung von Wasserwegsamkeiten).

Das Georadar-Messverfahren beruht auf der zerstörungsfreien Erkundung des Gebirges mit elektromagnetischen Wellen. Die Messapparatur besteht aus einer konstanten Anordnung einer Sender- und Empfängerantenne, die über den zu untersuchenden Untergrund bewegt wird. Die Messapparatur beinhaltet ferner einen Entfernungsmesser (je nach erforderlicher Genauigkeit Wegmesser, GPS oder herkömmliches Maßband) und einem Rechner für die Datenaufzeichnung. Von der Senderantenne wird ein Radarimpuls in den Untergrund ausgesandt, der an Grenzflächen und Strukturanomalien im Untergrund reflektiert wird. Das reflektierte Signal wird von der Empfängerantenne als sogenannte „Spur“ aufgezeichnet. Aus der Laufzeit zwischen dem Senden und Empfangen wird die Tiefenlage des Reflektors ermittelt. Das Ergebnis der Georadarmessung ist ein sogenanntes Radargramm.

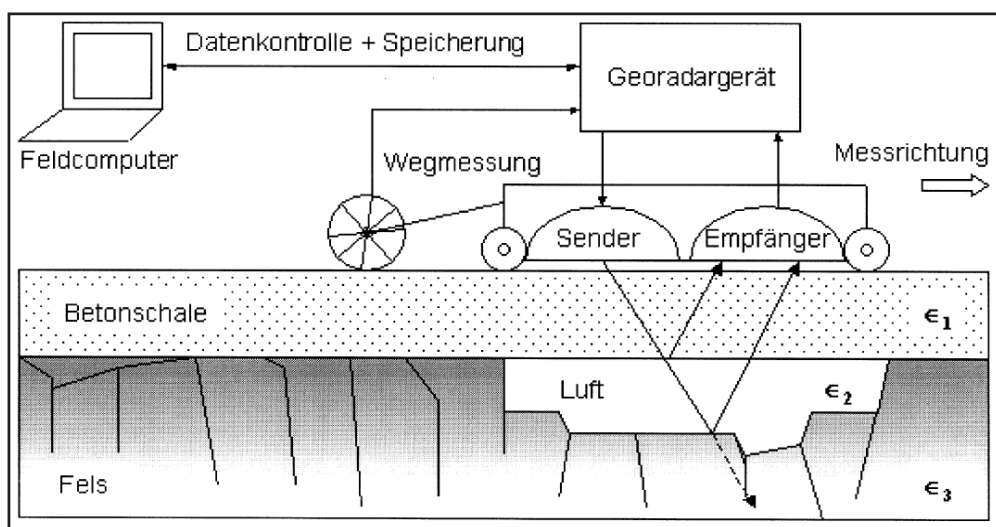


Abbildung 5-2: Georadarmessung (Meyer et al. 2002)

Die räumliche Auflösung der Georadarmessung hängt von der Sendefrequenz ab. Diese liegt in der Regel zwischen 50 MHz und 1000 MHz. Sender mit 1000 MHz werden fast ausschließlich in der zerstörungsfreien Prüfung des Bauwesens eingesetzt. Zur Untersuchung von Hangrutschobjekten, Sedimentgefügen oder auch unterirdischen Erosionsformen (Tunnelerosion) ist mit dem Bodenradar eine Auflösung im Dezimeterbereich für Eindringtiefen bis einige Meter gefragt und erreichbar; für Eindringtiefen bis einige Zehner Meter eine Auflösung im Meterbereich (Frequenzbereich ca. 50 bis 500 MHz). Mittels engmaschiger Vermessung einer Objektfläche ist die Gewinnung detaillierter 3D-Bilder des Untergrundes möglich. Je nach Messfrequenz beträgt die Auflösung der Messungen einige Meter bis Zentimeter.

Die Effektivität des Radarmessverfahrens hängt von der elektrischen Leitfähigkeit und von der Dielektrizität des untersuchten Mediums ab. Die Dielektrizität wirkt sich auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarimpulses ab. In Gesteinen und Mineralen wird die Dielektrizität hauptsächlich von der Mineralzusammensetzung, Porosität und Wassergehalt beeinflusst und hängt hauptsächlich von der Lithologie, Geometrie und elektrochemischen Interaktionen ab. Je größer der Unterschied in der dielektrischen Konstante zwischen zwei Medien, desto größer ist die Energie des reflektierten Impulses. Die dielektrische Konstante der Luft beträgt 1 (schnellste Ausbreitung) und 81 in Wasser (langsamste Fortpflanzung des Radarimpulses). In einem Gestein steigt die dielektrische Konstante mit zunehmendem Wassergehalt.

Die erreichbare Eindringtiefe des Radarimpulses hängt neben der Sendefrequenz von der elektrischen Leitfähigkeit ab. Je kleiner die Leitfähigkeit des Mediums, desto größer die Eindringtiefe. Die Leitfähigkeit hängt vom Wasser-, Mineral- und Tongehalt des Medium ab. Je höher die Sendefrequenz (z. B. im GHz-Bereich), desto größer die Auflösung jedoch desto kleiner ist die Eindringtiefe. Entsprechend bringen geringe Frequenzen (50 MHz) eine geringe Auflösung bei gleichzeitig größerer Eindringtiefe.

Das Radarmessverfahren ist zur Erkundung von Medien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit wie Salzgestein oder Kristallingestein besonders geeignet, da der Radarimpuls tief in das Medium eindringen kann und entsprechend viele Informationen gesammelt werden können. Hingegen ist die Eindringtiefe in Salzwasser gesättigten gut leitenden Medien nur wenige Zentimeter.

Mit dem Georadar-Messverfahren lassen sich auch komplexe Strukturen im Untergrund identifizieren, es liefert jedoch keine Auskunft über das Material selbst. Diese Information kann nur mit Hilfe von Bohrungen oder Aufschlüssen gewonnen werden. Eine Georadarmessung liefert die umfassendsten Informationen, wenn sie mit Bohrinformationen korreliert wird. Ferner lassen sich mit Georadarmessungen beispielsweise Leitungen, Rohre oder Fundamente orten. Ausschließlich das Georadarverfahren eignet sich zur Ortung von nicht-metallischen Stoffen.

Voraussetzung für den effektiven Einsatz des Georadar-Messverfahrens sind ausgeprägte Leitfähigkeitsunterschiede im Untergrund mit scharfen Grenzflächen. Die räumliche Lage der Reflektoren muss bekannt sein. Durch geologische Plausibilität gelingt es die gefundenen

Reflektoren zuzuordnen und das geologische Modell zu finden. Der Vorteil der Georadarmessung ist, dass sie logistisch einfach durchführbar ist. Ein Nachteil ist, dass die Messanordnung am Ort der Messung bewegt werden muss, und damit der zu untersuchende Bereich zugänglich sein muss.

Bei untertägigen Messungen sind die möglichen Messprofile durch die Strecken des Grubengebäudes vorgegeben. Außerdem wird die Messung im Vollraum durchgeführt, daher ist zusätzlich die Erfassung der Richtung, aus der eine Reflexion empfangen wird, erforderlich. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hat z. B. ein Auswerteverfahren für die räumliche Analyse der Reflexionen entwickelt. Hierbei wird für jede Reflexion die Empfangsrichtung bestimmt und über ein robustes Migrationsverfahren, der Wellenfrontrekonstruktion, die räumliche Lage jedes Reflexionspunktes berechnet. Zu jedem Reflexionspunkt kann eine Elementarfläche konstruiert werden, die den Reflexionsbedingungen genügt. Verbindet man diese Elementarflächen, so ergibt dies ein Band im Raum das den Verlauf der reflektierenden Grenzschicht wiedergibt. Da diese Reflexionsflächen komplizierte Gebilde im Raum sein können ist eine Darstellung mit einem interaktiven 3D-Grafiksystem sehr hilfreich bei der Interpretation.

An der BGR werden mehrere Messsysteme eingesetzt. Ein an der Oberfläche einsetzbares Pulsradarsystem ist von der Firma Geophysical Survey Systems (GSSI) vorhanden und ein weiteres von der Firma Hentschel, mit Antennen um in den Frequenzbereichen von 20 MHz bis 800 MHz zu messen. Zudem wird ein Stepped Frequency Radar System für den Einsatz im Hubschrauber entwickelt, das auch schon auf Bodenprofilen getestet wurde.

5.4.3 Geoelektrik

Bei geoelektrischen Messungen wird der spezifische elektrische Widerstand gemessen. Dieser ist in Gesteinsformationen umso größer, je kleiner der Wassergehalt ist. Darüber hinaus ist der elektrische Widerstand abhängig von der Lösungszusammensetzung. Neben dem Wassergehalt lassen sich Fließwege von Tracern in gesättigten und ungesättigten Medien mit geoelektrischen Messungen bestimmen, genauso wie gesteinsphysikalische Parameter, vorausgesetzt, dass der quantitative Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und dem gesteinsphysikalischen Parameter (aus Laboruntersuchungen) bekannt ist.

Geoelektrische Messungen eignen sich insbesondere für die Untersuchung von hochresistiven Salzgesteinen, in denen die vom Wassergehalt abhängigen Widerstandsvariationen besonders ausgeprägt sind ($<100 \Omega\text{m}$ bis $>108 \Omega\text{m}$). Damit lassen sich Feuchtezonen in Salzformationen nachweisen.

Geoelektrische Messungen eignen sich in der Endlagerung für:

- Standortcharakterisierung allgemein,
- Erkundung des Wirtsgesteins (Schichtung und Schichtlagerung, Einschlüsse, Verwitterungs- und Störungszonen, geomechanische Eigenschaften),
- Charakterisierung von Verschlussbauwerken,

- Erkundung von geogenen und anthropogenen Anomalien (Hohlräume, Restbauwerke, Archäologische Objekte)
- Hydrogeologische Verhältnisse (Differenzierung von Aquiferen und hydraulischen Eigenschaften)
- Erfassung der Ausbreitung von Laugen (z. B. bei Injektionsversuchen),

Die Anwendung geoelektrischer Methoden unter Tage ist jedoch aus mehreren Gründen schwierig. In Wieczorek & Rothfuchs (2006) werden folgende Nachteile aufgeführt:

- durch den Verlauf der Strecken und Schächte sind bestimmte Messanordnungen vorgegeben,
- die Messungen erfolgen linienhaft entlang einer Strecke, mehrere Linien erfassen den 3D-Raum, die Interpretation ist schwierig, da das komplizierte 3D-Grubengebäude die Messungen beeinflusst -> die Interpretation der Messsignale schwieriger als bei einer 2D-Messung an der Oberfläche,
- hohe Übergangswiderstände an den Elektroden,
- bei Messungen auf Kreisprofilen ist eine angepasste Inversion erforderlich, aber nicht einfach zu realisieren,
- die quantitativen Zusammenhänge zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand und den gesteinsphysikalischen Größen sind nicht eindeutig,
- untertage herrschen schwierige Umgebungsbedingungen.

Geoelektrische Messungen wurden in folgenden Projekten unter Endlagerbedingungen erprobt:

Überwachung der Aufsättigung einer geotechnischen Tonbarriere im Äspö-Felslabor mittels geoelektrischer Tomographie

Im Äspö-Felslabor wurde die Änderung des Wassergehaltes im hochkompaktierten Bentonit überwacht. Mit dem **Diplom-Dipol-Verfahren** mit beliebiger Orientierung der Dipole werden größere Gebirgsbereiche erfasst. Dieses Verfahren wird auch als geoelektrische Tomographie bezeichnet. Dabei werden typischerweise mehrere Hundert bis Tausend Einzelmessungen mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen durchgeführt. Aufgrund der großen Zahl von Einzelmessungen sind automatische Messsysteme unabdingbar (z. B. Messsystem von Geoserve in Kiel, das die Steuerung von 100 bis über 200 Elektroden ermöglicht).

Ausgehend von einem Startmodell wird durch die Finite-Element-Modellierung die erwartete Antwort mit den gemessenen scheinbaren spezifischen Widerständen verglichen. Die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten wird iterativ minimiert. Die theoretische Auflösung des Verfahrens ist durch den halben Elektrodenabstand begrenzt, wodurch die Größe der finiten Elemente bestimmt wird. Bei einer Elektrode an jedem zweiten Element im gesamten Modell wäre das System vollständig bestimmt. Generell ist die Genauigkeit des Verfahrens ortsabhängig. Nahe der Elektroden sind die Ergebnisse im Allgemeinen zuverlässiger als in größerer Entfernung. Da die Anzahl der Freiheitsgrade im dreidimensionalen Fall schnell sehr hoch wird und für zuverlässige Auswertungen damit ex-

trem viele Elektroden und Einzelmessungen nötig werden, sind dreidimensionale Auswertungen von tomografischen Feldmessungen bisher nicht realisiert, obwohl die Software zur Verfügung steht.

Mittels Elektroden wird die Resistivität im Versatz gemessen. Dazu wurden Elektroden aus Edelstahl verwendet. Besonders wichtig dabei war ein guter Kontakt der Elektroden zum untersuchten Material. Bei Bohrlochelektroden ist das Verfüllmaterial an das Material anzupassen, damit nicht Kurzschlüsse zwischen den Elektroden oder Isolatoren entlang der Elektroden entstehen. Verschiedene Techniken für niederohmige (z. B. Ton) und hochohmige (z. B. Salz) Gesteine werden eingesetzt.

Die mittlere Resistivität betrug kurz nach der Installation und Überdeckung mit Versatz 10 bis 14 Ωm , was einem Wassergehalt von 13 bis 14 % entspricht. Mit der Zeit nimmt der Wassergehalt durch Zufluss aus dem Gebirge vom Streckenrand her zu. Seit November 2004 ist eine recht homogene Resistivitätsverteilung mit Werten um 3 Ωm erreicht, was einem Wassergehalt von 21 bis 22 % entspricht. Damit ist der Versatz nahezu voll gesättigt.

Die Temperaturerhöhung des Versatzes bewirkt eine zusätzliche Resistivitätserniedrigung in der Größenordnung $< 1 \Omega\text{m}$.

Überwachung der Feuchteumverteilung im Rahmen eines Ventilationsversuches im Tonstein im Untertagelabor Mont Terri (Schweizer Jura)

Lokalisierung von Wegsamkeiten für Lösungen durch Injektionsversuche

EU-Projekt *BAMBUS* (*Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories*) II: Im Rahmen der Untersuchungen zur streckennahen Auflockerungszone wurde ein kleinräumiger Laugeninjektionsversuch mit **geoelektrischer Überwachung** durchgeführt. Ein System zur hydraulischen Charakterisierung des unmittelbaren Streckennahbereichs wurde entwickelt, das aus einer Kunststoffplatte von 1,8 m Kantenlänge besteht, welches auf die Streckensohle aufgelegt wurde. Mehrere Minibohrlöcher unterschiedlicher Länge durch Durchführung von Permeabilitätsmessungen wurden durch die Platte ins Salz gebohrt und abgeschlossen. Zusätzlich gehören vier Elektrodenbohrlöcher und zwei Oberflächenprofile zur der Anordnung. Die Elektroden liegen in zwei vertikalen Ebenen, die jeweils zwei Bohrlöcher und ein Oberflächenprofil beinhalten und sich im zentralen Laugeninjektionsbohrloch kreuzen.

Bei dem Laugeninjektionsversuch wurden insgesamt 8,8 l gesättigter Steinsalzlösung über das 10 cm tiefe Zentralbohrloch in das zunächst trockene Steinsalz injiziert. Dabei wurde kein Druckaufbau festgestellt, da die Lauge als benetzende Phase vom Porenraum schneller aufgenommen wurde als die Pumpe sie nachliefern konnte. Daher wurde keine Vollsättigung der Umgebung des Bohrlochs erreicht. Im Bereich der obersten 30 cm wurde die Resistivität im Versuch erniedrigt. In horizontaler Richtung schien die Resistivität über die Plattenränder ausgedehnt zu sein. Die Resistivität der befeuchteten Zone geht bis 200 Ωm herunter, was einem Laugeninhalt um 1 % entspricht. Da nur eine Teilsättigung erreicht wurde, muss die Porosität in diesem Bereich deutlich über 1 % liegen.

5.4.4 Gravimetrie

Die Gravimetrie basiert auf dem Prinzip der Massenanziehung (Gravitation). Dichteunterschiede im Untergrund verursachen unterschiedliche Schwerkraften, die jedoch nur geringfügig sind. Die können jedoch mit hoch empfindlichen Messgeräten, den Gravimetern, nach dem Prinzip der Federwaage gemessen werden. Moderne Gravimeter besitzen eine hohe mechanische Stabilität und Präzision. Aus den Schwereunterschieden können Erkenntnisse über Materialgrenzen und damit über den geologischen Aufbau des Untergrundes oder die tektonischen Verhältnisse abgeleitet werden. Die gravimetrischen Messungen können grob mit den Geschwindigkeiten elastischer Wellen korreliert werden.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Gravimetrie, sind deutliche Dichtekontraste. Die sind insbesondere bei folgenden Materialien gegeben:

- Lockergesteine und Festgesteine,
- saure und basische bzw. ultrabasische Kristallin-Gesteine,
- dichte und poröse Gesteine,
- wasserfreie und wasserführende Gesteine,
- Erze,
- Salzgesteine.

Der Vorteil von gravimetrischen Methoden ist, dass sie nicht durch artifizielle Strukturen (Versiegelungen, Leitungen, Fundamente, Streckenausbau) gestört werden und damit gerade in bebauten Arealen oder im in Betrieb befindlichen Bergwerken zum Einsatz kommen können.

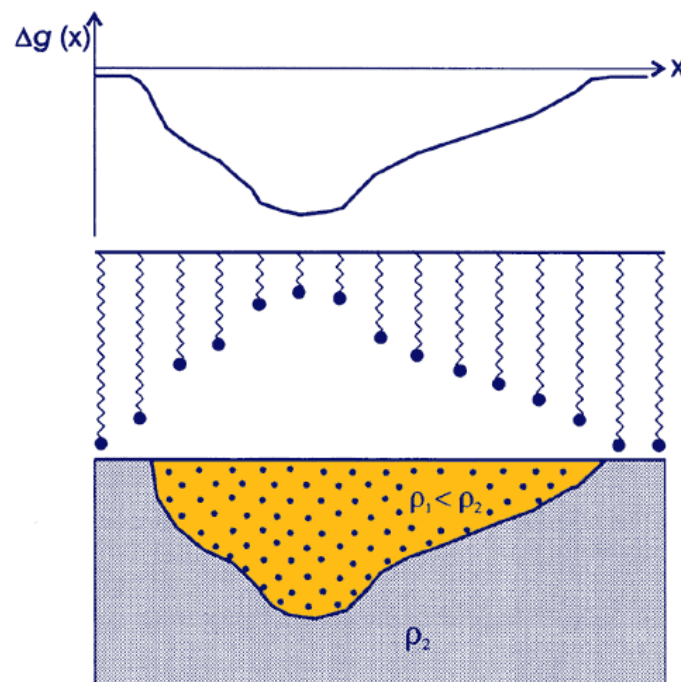


Abbildung 5-3: Prinzip der Gravitationsmessung (Knödel et al. 1997)

5.5 Geotechnische Messungen

5.5.1 Temperaturmessungen

Im Hinblick auf die Auslegung und die Konstruktion eines Endlagers ist die regionale Verteilung der natürlichen Gebirgstemperatur und der Temperaturgradienten relevant. Darüber hinaus sind Temperaturmessungen auch für verschiedene Temperaturkorrekturen (z. B. bei elektrischen Messungen) erforderlich.

Die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle innerhalb der geologischen Barriere *Granit und Tonstein* basiert anerkannter Maßen auf dem Einsatz einer zusätzlichen geotechnischen Barriere aus quellfähigem Ton (Bentonit) zur langfristigen Rückhaltung von Radionukliden. Um das Isolationspotenzial des Bentonits nicht zu beeinträchtigen, sollte der Bentonit, nach bisherigem Kenntnisstand, einer thermischen Belastung von maximal 100 °C ausgesetzt werden. Unter diesen Bedingungen wird eine Schrumpfung des Materials, die Bildung von Rissen sowie die Ausbildung einer Gasphase durch Verdampfung verhindert. Je nach Tiefenlage und regionalen Temperaturverhältnissen ergeben sich unterschiedlich zulässige Temperaturerhöhungen (siehe Abbildung 5-4), die im Rahmen der Endlagerauslegung berücksichtigt werden müssen.

Die maximal zulässige Temperatur im Wirtsgestein Salz wurde auf 200 °C festgelegt, nachdem Temperaturversuche ergeben haben, dass bei einer Erwärmung auf über 230 °C das Salzmineral Polyhalit zersetzt wird, so dass die Gefahr der Erhöhung der Salzpermeabilität besteht.

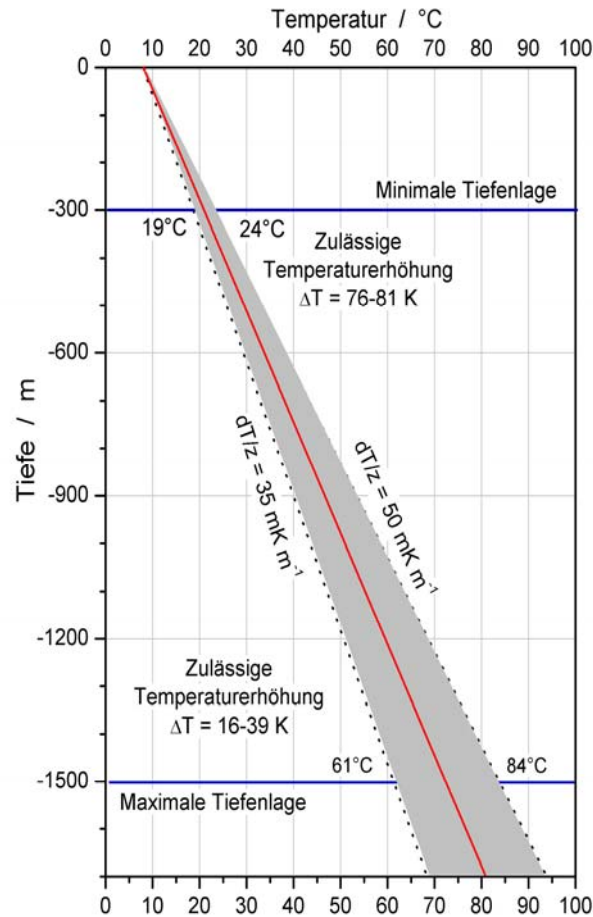


Abbildung 5-4: Beispiel für zulässige Temperaturerhöhungen als Funktion von Tiefenlage und Temperaturgradient

In Abbildung 5-4 ist beispielhaft gezeigt, dass je nach regionalem Temperaturgradient und Tiefenlage eines Endlagers deutlich unterschiedliche Temperaturerhöhungen zugelassen werden können, die sich signifikant auf Auslegungsgrößen wie Abkühlzeit der Behälter im Zwischenlager oder ihre Abstände zueinander auswirken können. Der geothermische Gradient wird im ausgeglichenen ungestörten Zustand vom terrestrischen Wärmefluss q (Wärmestromdichte) und der Wärmeleitfähigkeit λ bestimmt und kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{grad } T = - q / \lambda$$

Für die Temperatur-Tiefen-Funktion $T(z)$ mit einer Bezugstemperatur T_0 für $z = 0$ ergibt sich:

$$T(z) = T_0 + \text{grad } T$$

Zur Ermittlung der natürlichen Gebirgstemperatur sollte in mindestens einer, besser jedoch in mehreren Erkundungsbohrungen, die mindestens bis zur geplanten Einlagerungstiefe reichen, kontinuierliche Temperaturmessungen durchgeführt werden. Dies kann im Wesentlichen durch die Log-Messung oder die Permanentmessung erfolgen. Der Vorteil

einer Log-Messung liegt in der Tatsache, dass man bei geeigneter Fahrgeschwindigkeit eine bessere Ortsauflösung erzielt. Beispielsweise lassen sich so alle 10 cm Messwerte erhalten.

5.5.1.1 Log-Temperaturmessung

Bei der Anwendung von Log-Temperaturmessungen sollte mit einer hochauflösenden Temperatursonde gefahren werden, die in der Lage ist, im gesamten zu erwartenden Messbereich eine geeignete Auflösung zu erreichen. Bei einer neuen Bohrung müssen Temperaturlogs zu verschiedenen Standzeiten der Bohrung gefahren werden. Durch den Spülvorgang während des Bohrens ist das Temperaturfeld signifikant gestört. Durch Messungen zu verschiedenen Standzeiten kann der Wiederangleich der Temperatur beobachtet und durch geeignete Verfahren auf die natürliche Gebirgstemperatur extrapoliert werden (Abbildung 5-6). Eine Extrapolation ist allein schon aus zeitlichen Gründen sinnvoll, da der Wiederangleich, insbesondere bei tiefen Bohrungen, durchaus mehrere Jahre dauern kann.

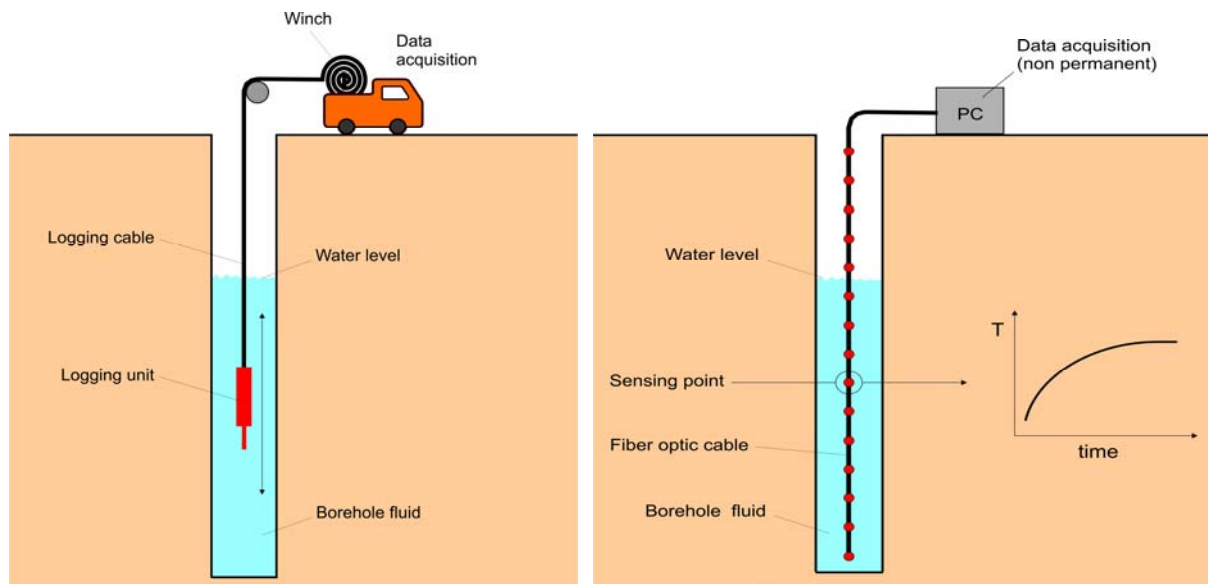


Abbildung 5-5: Temperaturmessung in einer Bohrung: Log-Messung (links) und Permanentmessung (rechts)

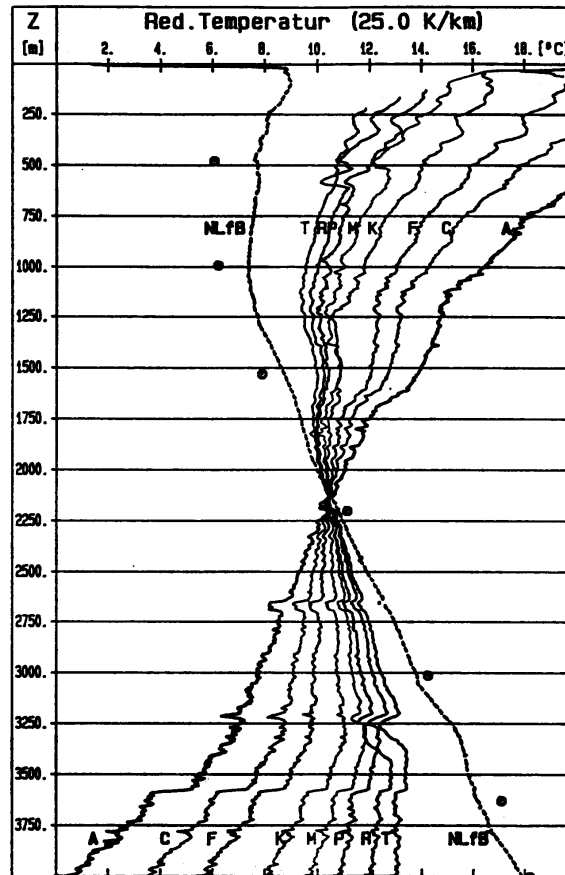


Abbildung 5-6: Temperatur-Logs zu verschiedenen Standzeiten einer Bohrung nach Beendigung des Bohrvorgangs in reduzierter Darstellung (KTB 1990)

5.5.1.2 Permanentmessungen mit optischen Temperatursensorkabeln

Bei einer Permanentmessung wird beispielsweise ein faseroptisches Temperaturmesskabel in die Bohrung gehängt, das über lange Zeit darin verbleibt. Längs dieses Kabels wird dann in definierten Abständen von z. B. 2 Metern die Temperatur kontinuierlich gemessen (Abbildung 5-5 (rechts)). Der Vorteil der Permanentmessung besteht darin, dass der Aufwand erheblich geringer ist und dass an vielen Messpunkten gleichzeitig die Temperatur kontinuierlich aufgezeichnet wird. Dabei kann eine hohe räumliche und zeitliche Messwertauflösung erreicht werden. Darüber hinaus findet keine Verwirbelung der Bohrlochflüssigkeit durch Befahrung mit einer Sonde statt. Die kontinuierliche Aufzeichnung des Wiederrangleichs erlaubt, bei Kenntnis der thermischen Spülungsparameter, auch eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins an jedem Messpunkt, so dass man ein Wärmeleitfähigkeits-Tiefen-Profil daraus ableiten kann. Eine Probe der Spülflüssigkeit sollte im Labor hinsichtlich WLF, spez. Wärmekapazität und Dichte untersucht werden.

Die optische Temperaturmessung kann folgende Anwendungen finden (Hurtig & Großwig 2000):

- Messung der Umgebungstemperatur von Bohrlöchern: Zur Abdichtung eines Bohrlochs und zur Abtrennung verschiedener Grundwasserleiter wird Tonstein eingesetzt. Der Quellvorgang von Tonstein (insbesondere Bentonit) führt zu einer deutlichen Störung des Temperaturfeldes in Grundwasserbohrungen. Ein faseroptisches Temperatursensorkabel kann vor der Verfüllung installiert werden, so dass die Temperatur am Kontakt zwischen der Verfüllung und der geologischen Formation gemessen werden kann, auch wenn das Bohrloch verbaut ist, das Bohrloch also nicht mehr zugänglich ist,
- Identifizierung hydraulischer Wegsamkeiten in einem Bohrprofil,
- Überwachung von exothermen Reaktions- oder Prozessabläufen,
- Messung von Flüssigkeitsspiegeln, wenn ein eindeutiger Temperaturunterschied zwischen der Flüssigkeit und dem darüber befindlichen Medium vorhanden ist, der Flüssigkeitsspiegel entspricht dann dem maximalen Temperaturgradienten.

Messprinzip

Der eigentliche linienförmige Temperatursensor ist ein wärme- und strahlungsempfindlicher Lichtwellenleiter. In den Lichtwellenleiter werden Laserimpulse eingeleitet, von denen ein Teil an den Molekülen des Lichtwellenleiters zurückgestreut wird. Die Intensität der zurückgestreuten Lichts ist direkt proportional zur Temperatur. Neben der Intensität wird auch die Laufzeit des Lichts gemessen, um dem Temperaturwerts seine genau Lage zuzuordnen. Die optische Temperaturmessung liefert die integrale Temperatur für einen kurzen Längenabschnitt des Lichtwellenleiters. Bei einem Zeitfenster von 10 ns beträgt der Längenabschnitt, für den die Integraltemperatur bestimmt wird, 1 m (Hurtig & Großwig 2000).

Vorteile optischer Temperatursensorkabel:

- passiv und streckenneutral, keine Beeinflussung des Temperaturfeldes,
- kleines Volumen mit geringen Gewicht, flexibel und einfach zu verlegen,
- Einbau auch an später nicht mehr zugänglichen Stellen möglich,
- Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen
- Keine Potenzialverschleppungen, Erdschleifen etc.,
- Einsetzbar in explosionsgefährdeten Anlagen,
- Kombination mit Edelstahlröhrchen: hoher mechanischer Schutz, unter hohem Druck einsetzbar,
- Unterschiedliche Ummantelungsmöglichkeiten, z. B. mit halogenfreien, schwer brennbaren Materialien, keine Korrosionsprobleme,
- geringe Wartungskosten: systembedingter Selbsttest,
- räumlich verteilte Temperaturmessung bezogen auf eine Strecke, Fläche oder Volumen,
- Auswertung der zeitlichen und örtlichen Temperaturänderung
- Variable Reichweite der Messung bis 20 km,
- Ortsauflösung 3 m bis 50 cm
- Temporaufauflösung +/- 2 K bis 0,1 K

5.5.2 Thermophysikalische Eigenschaften der Gesteine

Für eine endgültige Auslegung des Endlagers unter den gegebenen Standortbedingungen ist die Kenntnis der thermophysikalischen Gesteinsparameter erforderlich. Auslegungsrelevant in diesem Zusammenhang sind die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Dichte.

Grundlage für thermische Auslegungsberechnungen ist die in Abbildung 5-7 dargestellte dreidimensionale Wärmetransportgleichung, die sich prinzipiell in drei Faktoren aufteilen lässt: den konduktiven Wärmetransport, den advektiven Wärmetransport und die radiogene Wärmeproduktion. Letztere ist in ihrer Wärmeleistung derart gering, dass sie für die thermische Auslegung keine Rolle spielt. Der advektive Wärmetransport innerhalb des gering permeablen kristallinen Wirtsgesteins ist für die thermische Auslegung nur dann von Bedeutung, wenn signifikante Fluidbewegungen in nahegelegenen Klüftstrukturen vorhanden sind. Eine sorgfältige Analyse der Temperaturinformationen erlaubt allerdings Rückschlüsse auf regionale Fluidbewegungen zu ziehen, die für eine Betrachtung der langfristigen Sicherheit eines Endlagers von Bedeutung sein können.

3D instationäre Wärmetransportgleichung

$$\frac{\partial(\rho c)_e T}{\partial t} = \underbrace{\nabla \lambda_e \nabla T}_{\text{konduktiver Transport}} - \underbrace{v(\rho c)_f \nabla T}_{\text{advektiver Transport}} + \underbrace{H}_{\text{Wärme-Produktion}}$$

Auslegungs-relevant

- T = Temperatur / K
- ρ = Dichte / kg m^{-3}
- c = spezifische Wärmekapazität / $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
- λ = Wärmeleitfähigkeit / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
- v = Filtergeschwindigkeit / m s^{-1}
- H = Wärmeproduktionsrate / $\mu\text{W m}^{-3}$
- ∇ = Nabla Operator ($\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$)
- Indices:
- f = bezogen auf Fluid
- e = bezogen auf effektives Matrix-Fluid System

Abbildung 5-7: Wärmetransportgleichung und auslegungsrelevante Größen

Der konduktive Wärmetransport ist der bedeutende Faktor im Rahmen der thermischen Auslegung. Die in Abbildung 5-7 aufgezeigten Parameter spielen daher die entscheidende Rolle für die Temperaturentwicklung innerhalb der technischen Barriere und des Wirtsgesteins, so dass ihre genaue Kenntnis von großer Bedeutung ist.

Die aufgezeigten Parameter sind abhängig von Temperatur, Druck, Mineralzusammensetzung, Porosität und Porenfüllung. Die Größe, die durch die Einbringung der wärmeentwickelnden Abfälle signifikant verändert wird, ist die Temperatur. Aus diesem Grund sollen die thermophysikalischen Gesteinsparameter in Abhängigkeit der signifikant veränderlichen Größe Temperatur im Rahmen von Laborversuchen ermittelt werden. Die

gemessenen Abhängigkeiten sollen mathematisch beschrieben und in geeignete Computerprogramme zur Simulation der Temperaturentwicklung implementiert werden.

5.5.2.1 Messprogramm

Voraussetzung für Laborversuche ist, dass aus jeder lithologischen Einheit, die im Rahmen der geologischen Bohrkernaufnahme angetroffen wird, Bohrkernmaterial für die Untersuchungen bereitgestellt wird. Die Bohrkernstücke sollten so dimensioniert sein, dass aus ihnen mindestens 3-6 Proben zur Vermessung hergestellt werden können. Diese Anzahl von Proben ist mindestens nötig, um Streuungen der Messwerte, die sich durch unterschiedliche Mineralgröße, Mineralzusammensetzung und Porosität ergeben, erfassen zu können. Damit lassen sich dann repräsentative Mittelwerte für die unterschiedlichen lithologischen Einheiten angeben.

An den einzelnen Proben sollten folgende Messungen durchgeführt werden:

- | | |
|---|--------------------|
| 1. Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (und des Drucks) | $\lambda = f(T,P)$ |
| 2. Temperaturleitfähigkeit als Funktion der Temperatur (und des Drucks) | $\kappa = f(T,P)$ |
| 3. Spezifische Wärmekapazität als Funktion der Temperatur | $c_p = f(T)$ |

Die Proben haben durch die Entnahme aus dem natürlichen Gebirgsverbund eine Druckentlastung erfahren, die eine Öffnung von Mikrorissen zur Folge haben kann. Insbesondere die Messung der Wärmeleitfähigkeit ist dadurch deutlich beeinflusst. Aus diesem Grund sollten die Messungen in einer geeigneten Druckpresse durchgeführt werden, die in der Lage ist, den natürlichen Gebirgsdruck zu erzeugen, um sicher zu stellen, dass die Messwerte unter annähernd realen Druckbedingungen erzeugt werden.

Um Anisotropie-Effekte zu erfassen und zu quantifizieren, sollten speziell für die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit aus jeder lithologischen Einheit mindestens eine Probe senkrecht und parallel zur Bohrachse bzw. Schichtung vermessen werden.

Darüber hinaus sollten die Messungen an den einzelnen Proben sowohl im wassergesättigten als auch im trockenen Zustand (ggf. auch im teilgesättigten Zustand) durchgeführt werden, um den Einfluss der Porosität bzw. der Porenfüllung zu quantifizieren.

Auf eine Messung der Dichte der Proben kann bei Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit verzichtet werden, da sich die Größen mit Gleichung 2 ineinander überführen lassen.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Gleichung 2

mit:

- | | | |
|-----------|---|---|
| κ | = | Temperaturleitfähigkeit / $m^2 s^{-1}$ |
| λ | = | Wärmeleitfähigkeit / $W m^{-1} K^{-1}$ |
| ρ | = | Dichte / $kg m^{-3}$ |
| c | = | Spezifische Wärmekapazität / $J kg^{-1} K^{-1}$ |

5.5.2.2 Untersuchung der Art des Wärmetransports

Die Peclet-Zahl-Analyse (Abbildung 5-8) ist ein Verfahren, das die Möglichkeit bietet, Temperaturlogs aus Bohrungen nach Hinweisen für einen vertikalen advektiven Wärmetransport und damit nach regionalen vertikalen Wasserbewegungen zu untersuchen. Bei der Peclet-Zahl (Pe) handelt es sich um eine dimensionslose Zahl, die das Verhältnis zwischen dem Wärmetransport durch Advektion und dem durch Konduktion angibt. Sie kann mit folgendem vereinfachten Ansatz abgeschätzt werden:

$$\ln(q) = \ln(q_0) + z \text{ Pe}/L \quad \text{Gleichung 3}$$

mit

- q = Wärmestromdichte / W m⁻²
- z = Tiefe / m
- q₀ = Wärmestromdichte bei z₀ / W m⁻²
- L = Länge des untersuchten Tiefenintervalls / m

Eine lineare Regression von ln(q)=az+b ergibt die Steigung der Regressionsgeraden Pe/L und den Achsenabschnitt ln(q₀). q(z) kann numerisch durch Auswertung von q(z) = -λ dT/dz bestimmt werden.

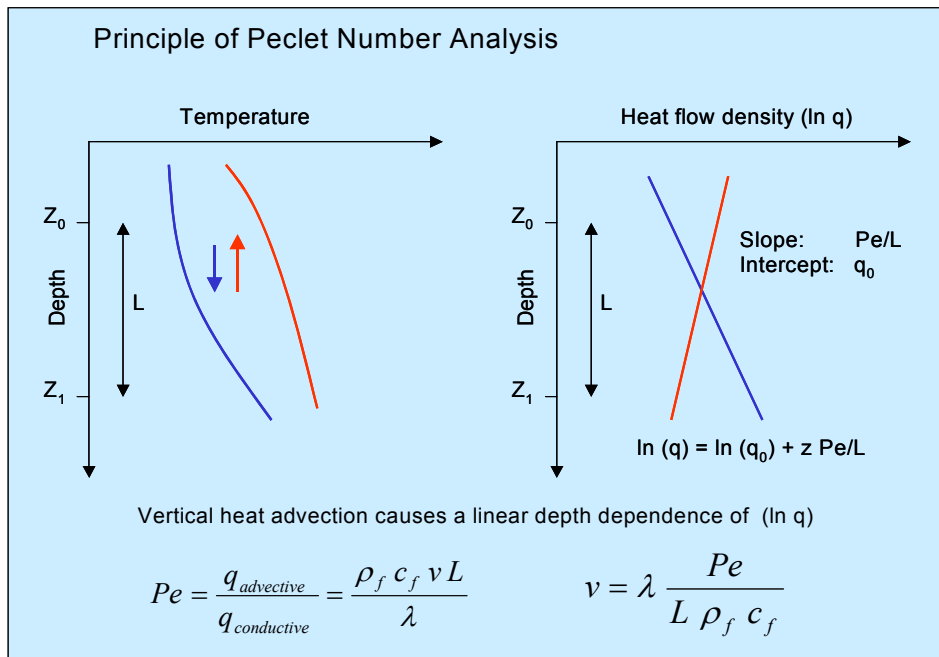


Abbildung 5-8: Prinzip einer Peclet-Zahl-Analyse (Clauser et al. 2002)

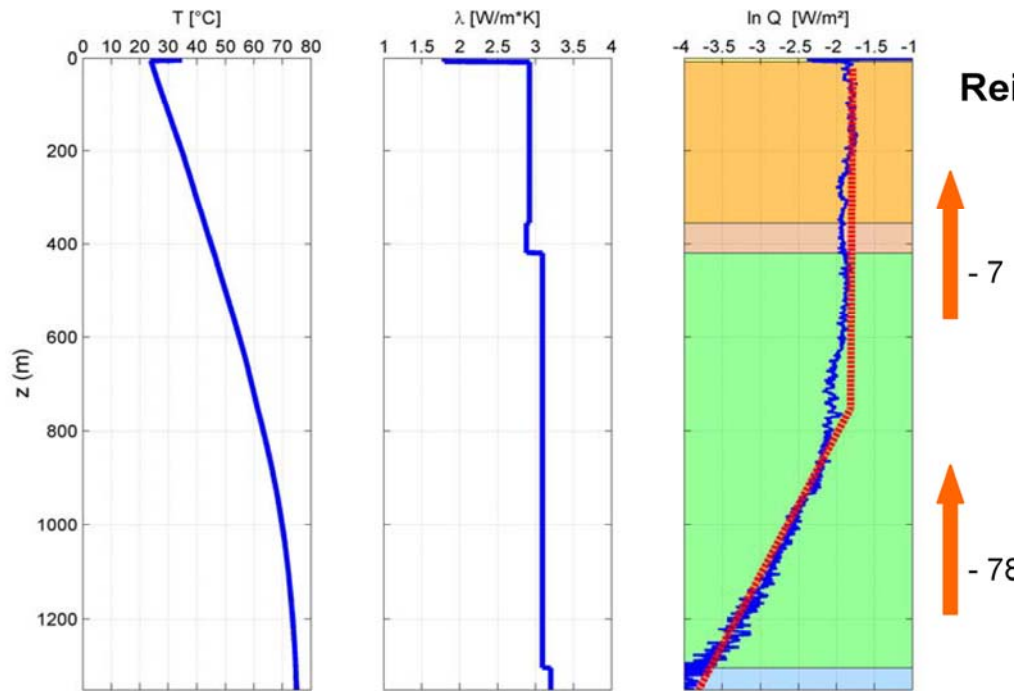


Abbildung 5-9: Bestimmung vertikaler Strömungsbewegungen mittels Peclet-Zahl-Analyse am Beispiel einer Bohrung in Deutschland (Clauser et al. 2002)

In Abbildung 5-9 wird beispielhaft die Bestimmung vertikaler Strömungsbewegungen mittels Peclet-Zahl-Analyse gezeigt. Nebeneinander dargestellt sind das Temperaturprofil, die Wärmeleitfähigkeiten und der natürliche Logarithmus der Wärmestromdichte, wobei letztere mit einer vereinfachten Lithologie hinterlegt ist. Die roten Linien zeigen stückweise lineare Anpassungen, aus deren Steigung die Peclet-Zahl gewonnen wird. Die daraus gefolgerte Fließrichtung, die sich aus dem Vorzeichen der Steigung ergibt, ist dabei mit Pfeilen markiert.

Voraussetzung ist, dass die Temperaturmessung die natürliche Gebirgstemperatur wieder spiegelt, dass es sich also um ein ungestörtes Temperaturlog handelt und dass die thermophysikalischen Parameter des umgebenden Gesteins, z. B. aus Messungen an Bohrkernen bekannt sind.

5.5.3 Felsmechanische in-situ Untersuchungen

Die felsmechanischen Untersuchungen umfassen Messungen zum primären Spannungszustand des Gebirges und zum Verformungsverhalten der Schichten, um den geomechanischen „Ist-Zustand“ des Gebirges, den regionalen Einspannungs- bzw. Grundspannungszustand, aufzunehmen. Mit den In-situ-Messungen (Dilatometer und Aufreißversuch) wird auch die Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Stoffgesetze auf das Gebirge überprüft.

5.5.3.1 Dilatometer-Versuch

Die Verteilung der elastischen Verformungseigenschaften des Gebirges kann durch Dilatometer-Messungen erfasst werden.

Beim Dilatometer-Versuch wird mit Hilfe einer speziellen Einzelpackersonde mit integrierten, jeweils um 120° zueinander versetzt angeordneten Wegaufnehmern die Bohrlochwand stufenweise durch Steigerung des Dilatometerdrucks be- und entlastet. Während des Versuches wird die Bohrlochdurchmesseränderung (Deformation) in Abhängigkeit vom aufgebrachten Druck gemessen. Aus den Messergebnissen ergeben sich Druck-Verformungskurven, von denen die Elastizitäts- und Verformungsmoduli des Gebirges abgeleitet werden können. Da bei jedem Versuch die Verformung mit drei Wegaufnehmern gleichzeitig in drei Richtungen gemessen wird, kann die Anisotropie des Gebirges bezüglich seiner Verformungsmoduli bestimmt werden.

5.5.3.2 Bestimmung der Klüftigkeit mit Intervallsonden

Zur Klärung der hydraulischen Verhältnisse im Untergrund ist die Häufigkeit, die Lage, die Vernetzung und die Rissbreite von Deformationsstrukturen von entscheidender Bedeutung, da sich der freibewegliche Grundwasserkörper im Wesentlichen auf Trennflächen und Klüften beschränkt. Neben Borehole Televiwer und dem Borehole Acoustic Televiwer kann die Klüftigkeit des Gesteins mittels seismischen Geschwindigkeitsmessungen erfolgen. Die seismischen Messgrößen zeigen eine besondere enge Korrelation zu allen Veränderungen im Gefüge des Gesteinsverbandes. In Bohrungen ist eine Bestimmung des Grades der Klüftigkeit und der Auflockerung sowie ihrer Tiefenreichweite mit hohem Auflösungsvermögen und großer Genauigkeit möglich. Dabei ist es günstig die Messungen mit Intervallsonden durchzuführen. Das Ergebnis ist eine teufenabhängige Geschwindigkeitsverteilung, wobei bevorzugt die senkrecht zur Bohrlochachse orientierten Klüfte erfasst werden. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgen bei gleichzeitiger Aufnahme der Schwingungsbilder. Die Amplituden zeigen Phasenverschiebungen bzw. Dämpfungen, wenn Klüfte starke Laufzeitveränderungen, auch hinter der Bohrlochwand, hervorrufen.

5.5.4 Verschiebungsmessungen

5.5.4.1 Konvergenzmessung

Gemessener Parameter

Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten in der Strecke [m]

Messziel

Durch die Konvergenzmessung wird die Gebirgsverformung des Schachtstoßes oder von Abbauen bestimmt. Ferner kann unter Berücksichtigung der geologischen sowie gesteinsphysikalischen und gesteinsmechanischen Eigenschaften des Gebirges durch Rückrechnung der gemessenen Verformung die Dimensionierung des Ausbaus überprüft werden.

Messprinzip

Unmittelbar nach Auffahrung werden Konvergenzmessquerschnitte festgelegt. An den Beobachtungspunkten werden Konvergenzbolzen in den Stoß einbetoniert oder auf Tunnelbögen aufgeschweißt. Die Messstrecken in Abbauen können vertikal oder horizontal sein. Die Messquerschnitte in den Strecken werden in der Regel mit jeweils acht auf den Schachttumfang regelmäßig verteilten Beobachtungspunkten eingerichtet. Mit dieser Anzahl an Punkten ist einerseits eine hohe Genauigkeit und Messsicherheit zu erreichen. Durch Extrapolation der Messwerte kann die Verformung für den Zeitraum, in dem keine Messungen durchgeführt wurden, ermittelt werden.

Die Konvergenzbolzen besitzen an ihrem tunnelseitigen Ende ein Gewinde mit Anschlag, an dem das Messmittel (Maßband, Draht) angebracht wird. Das Messmittel wird mit dem Konvergenzmessgerät, welches wieder an einem gegenüberliegenden Konvergenzbolzen befestigt ist, durch Federn vorgespannt. Die Längenänderung zwischen den Vergleichspunkten wird z. B. mit einer mechanischen Messuhr am Konvergenzmessgerät abgelesen.

Um Behinderungen des Baubetriebes möglichst gering zu halten, hat sich mehr und mehr das Erfassen der Konvergenzen durch geodätische Messung durchgesetzt. Hierzu wird statt der Konvergenzbolzen ein Messbolzen mit Leuchtdiode bzw. ein Bolzen mit aufgesetztem Reflektor einbetoniert und dessen Verschiebung mit einem Theodoliten gemessen. Dabei lassen sich die Messgenauigkeiten von ± 1 mm erzielen, die den Ansprüchen der Standsicherheitskontrolle eines Tunnelbauwerkes hinreichend entsprechen. Solche Messungen bieten gegenüber den Relativmessungen zwischen zwei beweglichen Punkten mit dem Konvergenzmessgerät den Vorteil, dass die Absolutverschiebungen der Tunnelschale gemessen werden, was bei den Konvergenzmessungen mit dem Konvergenzmessgerät nur in Kombination mit wenigstens einer geodätischen Messung möglich ist

Messgenauigkeit	Automatische Messungen	$\pm 0,1$ mm
Handmessungen		$\pm 0,5$ mm

Referenzen

Beispielsweise wurden in den Schächten des Erkundungsbergwerkes Gorleben im Zeitraum von 1986 bis 1993 fast 600 Messhorizonte eingerichtet und in mehr als 5.500 Messungen in diesen Horizonten die Schachtverformung beobachtet (Jessberger 1995).

5.5.4.2 Stoßschiebmessung

Gemessener Parameter

Abstand eines Stoßpunktes zum Schachtmittelpunkt [m]

Die Stoßschiebmessung ist eine Alternative zur Konvergenzmessung. Sie dient zur Ermittlung der Bewegung eines einzelnen Stoßpunktes in Richtung Schachtmittelpunkt und damit der Ermittlung der Radiusverringerng des Schachtes.

5.5.4.3 Extensometer

Gemessener Parameter Verschiebung entlang einer Messlinie [m]

Messziel

Durch Extensometer werden Verschiebungen entlang vorgegebener Messstrecken und über verschiedene Messabschnitte zur Bestimmung von Stauchungen, Dehnungen und Auflockerungen erfasst.

Messprinzip

Es wird die Strecke zwischen verankerten Messmarken, zwischen denen als Messmittel ein Draht, eine Stange oder eine Sonde befestigt ist, gemessen. Die häufigste Ausführungsform der Messmarken sind einzementierte Bolzen. In stark geklüftetem Fels ist eine Ummantelung der Bolzen mit einem Vliespacker vorteilhaft, welcher das Versickern des Injektionsgutes verhindert. Eine mechanische Ablesung ist insbesondere bei Langzeitbeobachtung wünschenswert (Fecker 1997), jedoch liefern elektrische oder optische Wegaufnehmer kontinuierliche Messwerte.

Messinstrument

Ein Extensometer besteht aus den Messmarken, dem Messmittel und einem Messkopf, an dem die Ablesung der Strecke erfolgt. Der Messkopf muss so ausgeführt sein, dass er weitestgehend gegen Beschädigungen geschützt ist. Bei einer Messstrecke spricht man von einem Einfachextensometer. Sind mehrere Messmarken vorhanden, wird die Messung mit einem Mehrfachextensometer vorgenommen.

Messgenauigkeit

Die elektrische Wegmessung erfolgt kontinuierlich mit einer Genauigkeit von 0,1 mm. Die optische Wegmessung hat eine geringere Genauigkeit von 1 mm. Die optische Wegmessung hätte den Nachteil, dass sie den Betrieb stören würde.

Tabelle 5-9: Erzielbare Genauigkeit mit Extensometern (Paul & Gartung (1991) in Fecker (1997))

Extensometer- typ	Stangen- und Drahtextensometer				
	Sondenextensometer				
Messauflösung	0,001 mm	0,0025 mm	0,025 mm	0,25 mm	2,5 mm
Messgenauigkeit	0,001 – 0,01 mm	0,0025 – 0,01 mm	0,025 – 0,10 mm	0,25 – 1,0 mm	2,5 – 10 mm
Messbereich	± 10 mm	25 mm	25 mm	50 mm	± 250 mm
Verschiebungsmaß mit Nachstellmaßnahmen	20 mm (± 20 mm)	50 mm	150 mm	300 mm	1000 mm
Länge der Messstrecke	≤ 1 m	≤ 10 m	≤ 30 m	≤ 100 m	< 100 m
Anwendungsbeispiele	Auflockerungszonen,	In-situ-Versuche,	Tunnel, Ein-	Große Kavernen,	Lange Messstrecken bei

	Quellhebungen, Bewegungen infolge Ausbruchphasen	z. B. Lastplatten- oder Scherver-suche) Auflocke-rungs-zonen	schnit-te, Funda-mentset-zungen	Tunnel in Fels geringer Festigkeit, Hangbewe-gungen	großen Hängen, Hangrutschungen
--	--	--	---------------------------------	---	--------------------------------

5.5.4.4 Fissurometer

Messparameter Relativbewegungen von Gebirgsblöcken an Klüften oder Rissen [m]

Messziel

Messungen von Teilkörperbewegungen an Klüften oder Rissen sagen zwar nichts über die Verformung des Gebirgskörpers oder eines größeren Bauwerks aus, können aber Aufschlüsse über den zeitlichen Ablauf und das jeweilige Stadium eines Bewegungsvorgangs geben (Fecker 1997).

5.5.5 Deformationsmessung

5.5.5.1 Dehnungsmessstreifen

Die mechanische Dehnung wird am häufigsten mit Dehnungsmessstreifen (basierend auf einer Metallfolie) gemessen. Diese Technologie wurde vor ca. 50 Jahren entwickelt und ist mittlerweile ausgereift.

5.5.5.2 Optische Dehnungsmessung

Für die Messung der Dehnung hat die DBE TECHNOLOGY GmbH ein optisches Messsystem entwickelt, das auf dem Bragg-Gitter als optischer Filter und der dazugehörigen Multiplexing-Technologie basiert (Jobmann et al. 2000).

Messprinzip

Ein Bragg-Gitter hat die Eigenschaft, Licht einer bestimmten Wellenlänge λ zu reflektieren, und ist damit ein optischer Filter. Das Bragg-Gitter entsteht durch Veränderung der Struktur des aus Germaniumoxid bestehenden Kernmaterials von Glasfasern durch einen ultravioletten Hochleistungslaser, der in das Kernglas Gitterstrukturen als Zonen mit unterschiedlichen Brechungsindizes einbringt. Diese Zonen wirken als Beugungsgitter. Durch die Gitterparameter ist festgelegt, welche Wellenlänge λ_G reflektiert wird. Wirkt eine Temperaturänderung oder Dehnung auf das Bragg-Gitter ein, wird die reflektierte Wellenlänge λ verschoben, was ein Maß für die Temperatur oder Dehnung ist.

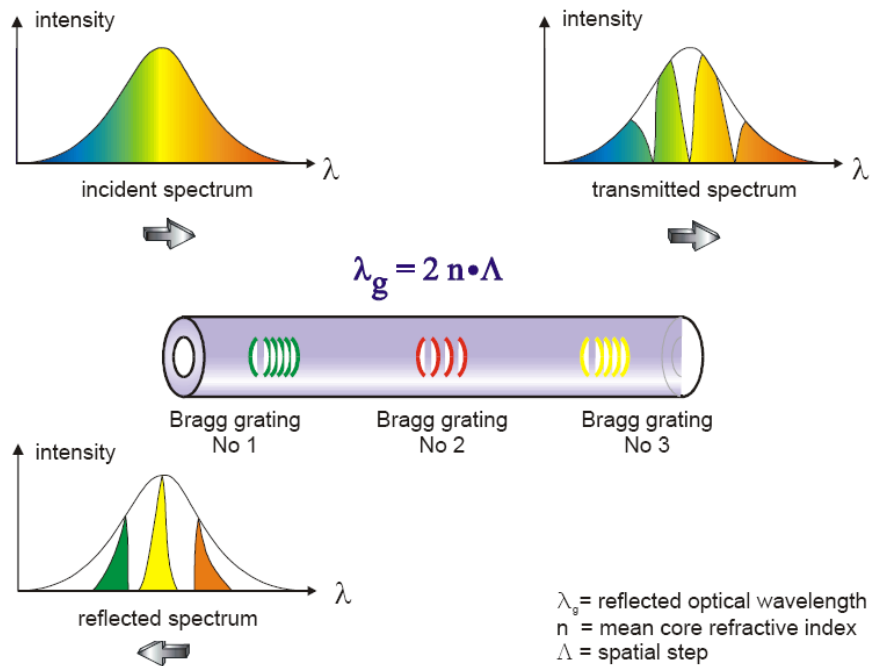


Abbildung 5-10: Prinzip der Dehnungsmessung mit optischem Sensor (Jobmann et al. 2000)

Die Dehnungsmessung mit Bragg-Gittern erreicht noch nicht die selbe Genauigkeit wie die Messung mit Metallfolien-Dehnungsmessstreifen (Kreuzer 2007). Allerdings empfiehlt sich die Anwendung von Bragg-Gittern aufgrund vieler Vorteile (Kreuzer 2007):

- die Messung großer Dehnungen ($> 10.000 \mu\text{m}/\text{m}$) ist möglich,
- Sensor ist klein und leicht,
- keine Empfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen,
- Sensor ist an sich passiv (benötigt keinen elektrischen Strom) und kann daher in Hochspannungs- und explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden,
- Sensorsignale sind unabhängig von der Entfernung (Verbindungsängen bis $> 50 \text{ km}$ möglich),
- hohe Langzeitstabilität,
- gute Korrosionsbeständigkeit,
- Sensoren können speziell für den Einsatz bei hohen ($> 700 \text{ }^\circ\text{C}$) oder niedrigen Temperaturen (kryogene Umgebungen) ausgelegt werden,
- leichte Installation (Zeit, Kabel, Prüfung).

Bragg-Gitter haben aber auch Nachteile (Kreuzer 2007):

- große Temperaturabhängigkeit ($\Delta\lambda/\lambda_0$ verursacht durch 1°C entspricht $\Delta\lambda/\lambda_0$ verursacht durch $8 \mu\text{m}/\text{m}$ mechanische Dehnung),
- die Temperaturkompensation ist aufwändig (erfordert eine spezielle Anordnung und das Auslesen von zwei Bragg-Gittern),
- hohe Empfindlichkeit gegenüber Doppelbrechung verursachenden Querkräften oder Druck,

- größere Steifigkeit gegenüber Metallfolien-Dehnungsmessstreifen,
- hohe Anschaffungskosten.

Die Bragg-Gitter-Sensoren sind eine sehr neue Technologie, die mittlerweile gut beherrschbar ist, jedoch noch nicht ausgereift ist; die größte Herausforderung liegt in der Notwendigkeit, die Dehnung fehlerfrei in die Faser einzuleiten (Kreuzer 2007). Die Bragg-Gitter-Technologie ist bereits die zweitwichtigste für Dehnungsmessungen eingesetzte Messmethode, nach den Metallfolien-Dehnungsmessstreifen (Kreuzer 2007).

5.5.5.3 Last-Deformationsmessung

Im Gebirge wird der Abstand zwischen zwei Punkten gemessen. Dann wird das Gebirge dazwischen aufgesägt (geschlitzt), wodurch der Abstand zwischen den zwei Punkten kleiner wird. Über Druckkissen wird das Gebirge in die ursprüngliche Position gedrückt.

Im Bohrloch wird mit einer Dilatationssonde in verschiedenen Richtungen die Verformung des Bohrloches bei Be- und Entlastung (mehrere Zyklen) gemessen. Daraus können Verformungsparameter/E-Modul bestimmt werden.

5.5.6 Kraft- und Spannungsmessungen

Die Kenntnis des Spannungszustands des Gebirges ist für die Beurteilung der Standfestigkeit von untertägigen Hohlräumen von wesentlicher Bedeutung. Das Spannungsfeld ist besonders kompliziert, wenn das mechanische Verhalten des Gebirges deutlich vom elastischen Verhalten abweicht, wie das zum Beispiel bei Steinsalz der Fall ist. Hier geht die Spannung größenordnungsmäßig in der 5. Potenz in die Rechnung ein.

5.5.6.1 Hydraulische Aufreißversuche (Hydrofrac)

Messparameter Betrag der kleinsten Hauptspannung [MPa]

Messziel

In hydraulischen Aufreißversuchen⁹ wird der Betrag der kleinsten Hauptspannung im Gebirge bestimmt. Zusätzlich kann durch den Einsatz der (passiven) Mikroakustik auch die räumliche Lage der entstandenen Rissfläche und damit auch die Orientierung der Rissfläche festgestellt werden. Im Nachgang des hydraulischen Aufreißversuchs lassen sich die erzeugten Risse durch eine Befahrung der Bohrungen mit einer Videokamera feststellen.

Messprinzip

In einem mit einem Packer abgedichteten Abschnitt eines Bohrlochs, dem Injektionsintervall, wird der hydraulische Innendruck so lange erhöht, bis das Gebirge aufreißt. Der Druckverlauf

⁹ Hydrofrac, engl. hydraulic fracturing

im Injektionsintervall wird aufgezeichnet. Aus dem Druckverlauf lässt sich der kritische Aufreißdruck und der Ruhedruck ermitteln. Der Ruhedruck stellt sich ein, wenn keine Flüssigkeit mehr zugeführt wird, und gibt die Größe der kleinsten Hauptspannung an.

Die mobile Messvorrichtung besteht aus folgenden Komponenten:

- Aufreißsonde (Doppelpackersonde),
- Zuführungsleitung für die Hydraulikflüssigkeit,
- Hochdruckpumpeneinheit,
- Hydraulikflüssigkeit,
- Datenerfassungsgerät.

Messgenauigkeit

Bei Verwendung eines geeigneten Programms für die Auswertung (z. B. HYDROCOM.SYS der Fa. HYDROTECHNIK GmbH) lassen sich die Drücke mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ MPa ermitteln (DBE 2008).

5.5.6.2 Druckkissen

Messparameter Spannung [MPa]

Messziel

Spannungsmessungen an Bauwerken

Messprinzip

Hydraulische Druckkissen, die mit einer Flüssigkeit gefüllt sind, werden in das Bauteil direkt einbetoniert. Wenn dieses Druckkissen eine geeignete Form besitzt, entspricht die Druckänderung in der Füllflüssigkeit des Kissens direkt der Druckänderung im Bauteil. Bei der Einbettung in ein elastisches Medium spielen Länge und Elastizität des Druckkissens eine wesentliche Rolle. Die elastischen Eigenschaften des Druckkissens sollten den Eigenschaften des umgebenden Gebirges oder Baumaterials ähneln und/oder die Dosenhöhe solle verkleinert werden.

5.5.6.3 Spannungsmonitorstationen

Messparameter Spannung [MPa]

Messziel

Spannungsmonitorstationen erlauben die Erfassung thermisch induzierter Spannungsänderungen und langfristig auftretender Spannungsumlagerungen im Endlager.

Messprinzip

Die Spannungsmonitorstationen werden mit sechs Druckkissen ausgestattet und in Bohrungen eingebaut. Das Bohrloch wird wieder verfüllt und ggf. noch mal mit Harz nachinjiziert, um

so einen Anschluss der Kissen im Bohrloch an das Gebirge zu erreichen. Die Orientierung der Spannungsmonitorstationen ermöglicht bei homogenen Gebirgs- sowie Ankopplungsverhältnissen die Bestimmung des ebenen Spannungszustands in Richtung der Bohrlochachse und normal dazu. Der Innendruck der SMS wird durch Edelstahlleitungen hydraulisch auf einen Schwingsaitensensor übertragen. Die Messwertaufnahme erfolgt mit elektrischen Aufnehmern.

Messgenauigkeit

Gängige Spannungsmonitorstationen weisen eine Genauigkeit $\pm 0,2$ MPa auf, in einem Messbereich von 30 MPa.

5.5.6.4 Versatzdruckmessung

Messparameter Vertikaler Druck zwischen Versatzkörper und Abbausohle [MPa]
 horizontaler Druck des Versatzkörpers auf die Stöße [MPa]

Messprinzip

Durch Versatzdruckmessungen wird der vertikale Druck zwischen einem Versatzkörper und der Sohle eines untertägigen Hohlraums sowie der horizontale Druck des Versatzkörpers auf die Stöße in repräsentativen Querschnitten gemessen.

Das Messsystem besteht aus hydraulischen Druckkissen mit einer Fläche von beispielsweise 20 cm x 30 cm, an denen elektrische Sensoren zur Druck- und Temperaturmessung angeschlossen sind. Als Messumformer werden Schwingsaitenaufnehmer zur Druckmessung und Thermistoren zur Temperaturmessung verwendet. Die Druckkissen werden zur Sohle auf jeweils einen Sockel bzw. zum Stoß in flache Nischen bündig eingemörtelt.

5.6 Hydrogeologie

Für die Beurteilung der Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers sind die Grundwasserhältnisse von zentraler Bedeutung, da sie wichtige Rahmenbedingungen für die Freisetzung der Radionuklide aus dem Wirtsgestein und für die Ausbreitung in die Geosphäre definieren. Darüber hinaus bilden die Grundwasserverhältnisse den Ausgangspunkt für die quantitative Bewertung der geologischen Barriersysteme. Die Grundlage der hydrogeologischen Untersuchungen stellt die Charakterisierung des Wirtsgesteins, der Nebengesteine und der regionalen Aquifere unter Einbeziehung aller verfügbaren Daten wie z. B. Geometrie, laterale und vertikale Variabilität, Fließverhalten (Kluft-/Porenwassertransport), Verteilung von Durchlässigkeiten dar. Ergänzende Beiträge zum Verständnis der regionalen Grundwasserverhältnisse ergeben sich aus der Hydrochemie.

5.6.1 Verfahren zur Charakterisierung der hydrogeologischen Situation innerhalb der Schichtenfolge

Die hydrogeologischen Untersuchungen umfassen vor allem

- die Erkundung der hydraulischen Eigenschaften von regionalen Aquiferen (Grundwasserleitern) und Aquitarden (Grundwasserstauern),
- die Gewinnung von Erkenntnissen über geohydraulische Verbindungen, Barrieren oder andere hydraulische Inhomogenitäten (z. B. regionaltektonische Strukturen) im Untergrund sowie
- die Beschreibung des hydraulischen Zustands.

Ein wesentliches Ziel ist der Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins als primäre geologische Barriere. Der Nachweis kann geführt werden, indem die Diffusion der maßgebende Transportprozess von gelösten Wasserinhaltsstoffen im Wirtsgestein ist und der advective Fluss des Porenwassers eine untergeordnete Rolle spielt. Die Diffusion ist die durch das Konzentrationsgefälle verursachte Migration gelöster Stoffe im Grundwasser. Sie wird durch den Diffusionskoeffizienten beschrieben. Ein advektiver Transportprozess setzt eine verbundene Poren- oder Kluftstruktur voraus. Der Durchlässigkeitswert in der Höhe von 10^{-12} [m/s] kennzeichnet etwa die Grenze zwischen advektivem und diffusivem, also von der Grundwasserbewegung unabhängigem und daher unvermeidlichem Radionuklidtransport im Grundwasser (AKEnd 2002). Die Peclet-Zahl-Analyse (Kapitel 5.6.5.1) liefert ein Kriterium zur Beurteilung des Transportprozesses.

Der Einfluss von tektonischen Störungen und Störungszonen auf das allgemeine Fließgeschehen ist zu klären. Generell können Störungen entweder spröde deformierte, durchlässige Strukturen oder aber im Gegenteil Zonen mit geringerer Durchlässigkeit darstellen. Durch den vertikalen Versatz von Schichten entlang einer Störung können entweder hydraulische Verbindungen zwischen verschiedenen Aquiferen geschaffen oder Aquifere unterbrochen bzw. in seitlichen Kontakt zu gering durchlässigen Gesteinen gebracht werden.

Zur Klärung der hydraulischen Verhältnisse und damit zur Ermittlung der Eingabedaten für das hydrologische Modell werden hydrogeologische Karten ausgewertet, Abflussdaten der Oberflächengewässer erhoben und Pumpversuche sowie Bohrlochtests durchgeführt. Wenn weder Pumpversuche noch hydraulische Tests auswertbar sind, kann eine Abschätzung der Durchlässigkeiten der einzelnen Gesteinsschichten anhand von Korngrößenanalysen sowie Permeabilitätsversuchen an ungestörten Proben erfolgen. Details zu sämtlichen hydrogeologischen Untersuchungsmethoden können aktuellen Lehr- bzw. Handbüchern entnommen werden (z. B. Langguth & Voigt (2004), Schreiner & Kreysing (1998)).

In Tabelle 5-10 ist die Eignung von Pumpversuchen und von ausgewählten Bohrlochtests für verschiedene Gebirgsdurchlässigkeiten gegenübergestellt.

Tabelle 5-10: Eignung von Bohrlochtests für verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte (verändert und ergänzt nach NLfB (1986b), Schneider (1987) und LfU (1991))

		k _r -Wert (m/s)											
		1E-11	1E-10	1E-9	1E-8	1E-7	1E-6	1E-5	1E-4	1E-3	1E-2	1E-1	
Festgesteinsseigenschaften überwiegen	Pumpversuche ⁺				■ ■								
	WD-Test ^{**}			■ ■									
	Slug-Bail-Test ^{***}		■				■ ■						
	Drill-Stem-Test ^{***}		■				■ ■						
	Pulse-Test ^{**}									■ ■			

* NLfB (1986b)

** Schneider (1987)

*** LfU (1991)

5.6.2 Erkundung und Überwachung des oberflächennahen Grundwassers

Abflussdaten der Oberflächengewässer, die das Gebiet um den Referenzstandort entwässern, müssen bestimmt und hinsichtlich des Abflussverhaltens der Gewässer ausgewertet werden. Die Abflussdaten tragen dazu bei, den Austausch zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser beurteilen zu können. Weiterhin erlauben sie, die Herkunft und Entstehung des mineralisierten oberflächennahen Grundwasser zu klären. An den Vorflutern, die das Untersuchungsgebiet entwässern, sind Messstellen einzurichten. Die Abflüsse der Vorfluter sind über Pegelaufzeichnungen und Abflusskurven kontinuierlich zu erfassen. Die Grenzen des hydrologischen Modells werden anhand der Lage der Vorfluter und Wasserscheiden festgelegt.

5.6.3 Pumpversuche

Pumpversuche zählen zu den am häufigsten angewandeten Untersuchungsverfahren, um Auskunft über das Leit- und Speichervermögen des Gebirges zu erhalten. Bei diesen Versuchen wird mit einem bekannten Signal in Form einer zeitlich befristeten Wasserentnahme auf ein unbekanntes System, dem Aquifer, eingewirkt.

Es sind lediglich die Eingabe- und Ausgabesignale bekannt, die mit Hilfe der allgemein bekannten geologischen und hydrologischen Eigenschaften des Aquifers gedeutet werden müssen. Pumpversuche können stationär und instationär ausgeführt werden. Angaben zur Durchführung und zur Auswertung von Pumpversuchen werden in aktuellen Lehr- und Handbüchern wie z. B. Hölting (1996) und LfU (1991) gemacht.

Der prinzipielle Aufbau eines Pumpversuches ist am Beispiel der oberflächennahen Deponie-erkundung in den Unterkreidetonen von Mönchshagen in Abbildung 5-11 dargestellt. Die Abbildung zeigt den Lageplan der Bohrungen mit dem Entnahmehrungen im Zentrum des Versuchsfeldes und den sechs Beobachtungsbrunnen, die kreisförmig um den Entnahme-

brunnen in einem Abstand von 4 m angeordnet sind. Die Beobachtungsbrunnen wurden mit unterschiedlichen Teufen von 10 – 25 m angelegt. Der tiefste Bereich der einzelnen Bohrungen wurde mit der Verfilterung versehen um teufen- bzw. horizontspezifische, hydraulische Kenndaten zu erhalten.

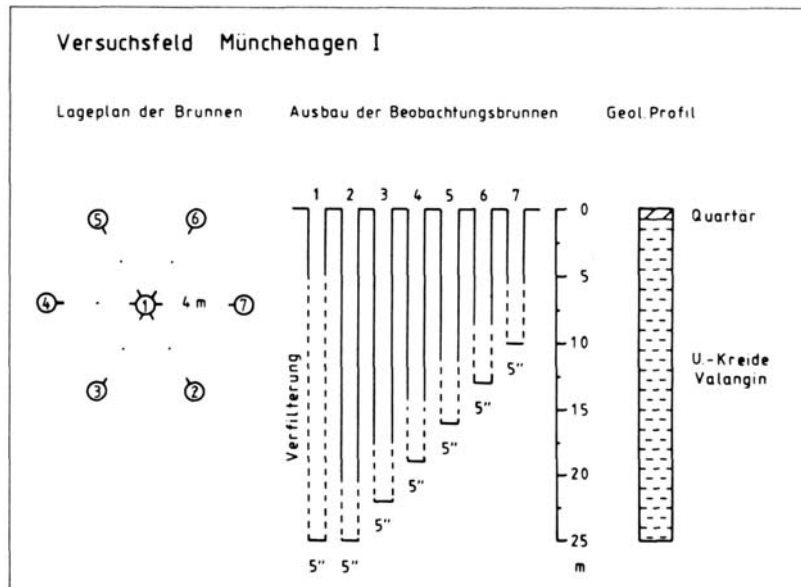


Abbildung 5-11: Aufbau eines Pumpversuches am Beispiel Münchehagen I (NLfB 1986b)

Wird nun aus dem Entnahmebrunnen mit einer konstanten Förderrate Wasser entnommen, entsteht in seiner Umgebung ein Absenkungstrichter, der zu einem bestimmten Zeitpunkt (t) eine Reichweite (r) besitzt. Innerhalb des Trichters wird das Standrohrspiegelgefälle in den Beobachtungsbrunnen aufgenommen. Daraus lässt sich der hydraulische Gradient ableiten, der zum Brunnen hin ausgerichtet ist. Ändern sich Absenkung und Reichweite nicht mehr, so dass die Förderrate aus dem Brunnen gleich der Zuflussrate ist, hat sich der stationäre Zustand eingestellt. Bei Pumpversuchen in Kluftaquiferen wird die Einstellung des stationären Zustandes nicht abgewartet, da eine außerordentlich lange, d. h. kostenaufwendige, Pumpzeit erforderlich ist. Die Einstellung eines instationären Zustandes reicht schon aus um einen Pumpversuch auszuwerten. Im instationären Zustand sind Förderrate und Rate des Zuflusses von außen her ungleich groß. Die Absenkung kennzeichnet eine Vorratsentnahme von Grundwasser aus dem Porenraum. Für stationäre und instationäre Strömungsverhältnisse sind naturgemäß verschiedene Berechnungsverfahren erforderlich. Anhand der raum(r)-zeitlichen(t) Auswertung der Veränderungen der Grundwasserstände (Grundwasserpotenziale) können folgende Eigenschaften und Kenndaten ermittelt werden:

- grundwasserleitende Eigenschaften (Transmissivität und Durchlässigkeit),
- grundwasserspeichernde Eigenschaften (Speicherkoeffizient und spezifischer Speicherkoeffizient),
- Richtungsabhängigkeit hydraulischer Kenndaten (hydraulischer Gradient bei vertikalen und horizontalen Anisotropien),

- Lage und Wirksamkeit hydraulisch wirksamer Aquiferränder (Stau- und Infiltrationsgrenzen),
- Leckagen und vertikale Durchlässigkeiten geringleitender über- bzw. unterlagernder Schichten (Leckagefaktoren, hydraulische Widerstände),
- Brunnen- und Bohrlocheinflüsse (Brunnenverlust, Brunnenspeicherung, Bohrlochwandeffekte).

Die Voraussetzungen zur Anwendung von Pumpversuchen ist ein hydraulisch zusammenhängender, frei beweglicher Grundwasserkörper in der Schichtenfolge des Untersuchungsgebietes. Dieser Grundwasserkörper ist im kristallinen Gestein oder Tonstein im Wesentlichen auf Deformationsstrukturen wie Trennflächen und Klüfte beschränkt. Neben der Häufigkeit der Deformationsstrukturen ist für die Gebirgsdurchlässigkeit entscheidend, ob sie miteinander vernetzt sind und ob sie mit Mineralisationen gefüllt sind.

Die förderbare Grundwassermenge aus dem Gebirge begrenzt die Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit mit Hilfe von Pumpversuchen. So können Pumpversuche im Salzstein, das durch geringe hydraulische Durchlässigkeit und niedrige Porosität gekennzeichnet ist, nicht ausgewertet werden.

5.6.4 Hydraulische Bohrlochtests

Die hydraulischen Bohrlochtests werden in Sondierbohrungen ausgeführt. Sie erlauben im Gegensatz zu Pumpversuchen jedoch nur eine räumlich eng begrenzte Bestimmung der hydraulischen Kennwerte. In der Regel werden dabei allgemeine Randbedingungen wie homogene, isotrope, unbegrenzte und ungespannte Grundwasserleiter zugrundegelegt.

5.6.4.1 Drill Stem Test (DST)

Der DST wird vorwiegend während des Abteufens einer Bohrung eingesetzt. Zur Isolierung der Testintervalle werden an einem Packergestängerohr Einfach- oder Mehrfachpacker abgesetzt. Im ersten Fall wird das Bohrloch unterhalb des Packers, im zweiten Fall die Strecke zwischen den Packern getestet. Der erfasste Gebirgsbereich beträgt einige Dezimeter bis mehrere Meter.

Am unteren Ende eines Packergestängerohres ist ein Testventil eingebaut, mit dem die Verbindung zwischen dem abgepackerten Bohrlochintervall und dem Gestängerohr geöffnet und geschlossen werden kann. Nach und während des Tests werden kontinuierlich Druck und Temperatur in der abgepackerten Strecke und im Gestänge gemessen und aufgezeichnet.

Der DST besteht aus mehreren Phasen:

- Einbau der Apparatur in der vorgesehenen Untersuchungstiefe und Setzen bzw. Aufblasen der Packer.

- Messung des Anfangdruckes im Testintervall mit geschlossenem Testventil.
- Öffnen des Testventils für einige Minuten (1. Fließphase). Das Wasser kann vom Testintervall in das Gestänge strömen. Dieser Vorgang bewirkt einen plötzlichen Druckabfall mit nachfolgendem, langsamen Druckaufbau im Testintervall.
- Schließen des Testventils (1. Druckaufbau). Während dieser Phase steigt der Druck in dem Testintervall relativ schnell wieder an.
- Wiederholung der vorangegangenen beiden Schritte, um erneut Fließphasen und Druckaufbaukurven zu erzeugen. Die resultierenden Druckkurven werden zur Berechnung der Permeabilität benötigt.
- Schließen des Testventils (letzter Druckaufbau) und Warten, bis der Druck im Testintervall soweit angestiegen ist, dass eine Berechnung der hydraulischen Druckspiegelhöhe, z. B. durch Extrapolation, möglich ist.

Der Druckverlauf wird als Funktion der Zeit registriert. Die Form der Druckkurven, die erreichten Drücke und die dazugehörigen Zeiten erlauben auf der Bohrstelle einen ersten Überblick über das hydrostatische Niveau, hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität. Eine genauere Interpretation der Kurven erfolgt unter der Voraussetzung konstanten Zustroms in der Fließphase nach Theis (1935) oder Horner (1951). Musterkurven gibt es für eine Vielzahl möglicher Formationstypen (homogen, heterogen, Porensysteme, Kluft-Matrix-Porensysteme), Anfangsdruckverläufe unter Berücksichtigung des Bohrlochspeicher- und Bohrlochwandeffekts (Skin-Effekt) und für die späte Druckverlaufphase. Heute überwiegen numerische Auswerteverfahren.

Der DST liefert brauchbare Ergebnisse in mäßig durchlässigen Horizonten. Für sehr durchlässige und sehr gering durchlässige Zonen sind sie nicht geeignet, da die Kurven des registrierten Druckverlaufes entweder zu steil oder zu flach werden. Bei niedriger Permeabilität werden zur Verkürzung der erforderlichen Testdauer Wasserinjektions-Tests (Pulse-Injektion-Tests) durchgeführt.

5.6.4.2 Slug-Bail-Test (Auffüllversuch)

Der Slug-Bail-Test ist wie der DST für die Bestimmung der Durchlässigkeit im Bereich von 10^{-9} bis 10^{-6} m/s geeignet. Beim Slug-Bail-Test handelt es sich um einen Auffüllversuch, bei dem durch das Einschütten einer bestimmten Wassermenge eine kurzzeitige Anhebung des Wasserspiegels hervorgerufen wird. Hierdurch wird eine Potenzialdifferenz zwischen dem erhöhten Wasserstand im Brunnen und dem Wasserstand im umgebenden Gebirge erzeugt. Diese Potenzialdifferenz bewirkt ein Abfließen aus dem Brunnen in das benachbarte Gebirge so lange, bis nach der Druckerholung der ursprüngliche Wasserstand wieder erreicht ist. Die zeitliche Änderung der Wasserspiegelhöhe wird gemessen. Die Anhebung des Wasserspiegels im Brunnen wird häufig durch das Eintauchen eines Verdrängungskörpers (Slug-Körper) unter den Wasserspiegel im Testbrunnen erreicht.

Der umgekehrte Vorgang, d. h. ein Zufluss aus dem umgebenden Gebirge, wird durch das Entfernen des Verdrängungskörpers aus dem Brunnen erzeugt. Diese Variante wird als Bail-Test bezeichnet und meist im Anschluss an einen Slug-Test durchgeführt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Wasserspiegeländerung beider Versuche lässt sich bei bekannter Brunnengeometrie die Durchlässigkeit berechnen. Die Erfassung der Wasserspiegeländerung erfolgt durch eine piezoresistive oder kapazitive Wasserstandssonde.

In Geringleitern steht zur Auswertung das Typenkurvenverfahren nach Cooper et al. (1967) zur Verfügung, da bei diesem Verfahren Bohrloch- und bohrlochnahe Effekte berücksichtigt werden, die das Ergebnis stark beeinflussen können. Das Verfahren setzt jedoch eine längere Messdauer bzw. eine 70 bis 90 % Druckerholung zur Auswertung voraus.

5.6.4.3 Pulse-Injektion-Test

Der Pulse-Injektion Test ist ein modifizierter Slug-Test und unterscheidet sich vom herkömmlichen Slug-Test durch die impulsartige Druckänderung (Bredehoeft & Papadopoulos 1980).

Bei der Versuchsanordnung wird in einem mit Packern abgedichteten Bohrlochintervall (Einbohrlochmethode) nach Einstellung des Ruhedruckpotenzials eine impulsartige Druckänderung herbeigeführt. Beim Druckerhöhungs-Test wird eine kurzfristige Druckbeaufschlagung und beim Druckabsenk-Test eine kurzfristige Druckminderung vorgenommen. Nach dem Schließen des Testventils wird der Druckabbau/-aufbau im abgepackerten Bereich als Funktion der Zeit aufgezeichnet.

Beim Pulse-Test wird nur die unmittelbare Umgebung des Bohrloches bis ca. 1 m erfasst. Aufgrund der geringen Eindringtiefe des Druckimpulses wird die Auswertung durch Bohrlochwandeffekte (Skin-Effekt) und die Brunnenspeicherung (Bohrlochkapazitätskoeffizient) stark beeinflusst. Zur Auswertung von Pulse-Tests werden dieselben Slug-Test Typkurvenverfahren verwendet, da dort diese Effekte als Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes mittels Typkurvenverfahren liefert bei ausreichender Messdauer gute Ergebnisse.

5.6.4.4 Wasserdruck- (WD-)Test

Beim WD-Test wird in einem abgepackerten Bohrlochabschnitt (Länge 1 m) Wasser unter Druck in das Gebirge verpresst. Sowohl der Druck als auch die Verpressmenge werden kontinuierlich gemessen. Die Auswertung der bei Druckkonstanz in aufsteigender und absteigender Reihenfolge ermittelten Durchflusswerte erfolgt qualitativ über ein Q(Durchflussmenge)-P(Druck)-Diagramm. Die Durchflussmenge wird dabei gegen den jeweils eingestellten Druck für jede Druckstufe aufgetragen und verbunden. Die Auswertung des WD-Tests kann nach den Typkurven- und Gradlinienverfahren von Schneider (1987) erfolgen.

Nach Untersuchungen von Heitfeld & Koppelberg (1981) kann die Gebirgsdurchlässigkeit auch anhand der verpressten Wassermenge, die bei Drücken von z. B. bei 1 bar bestimmt wurden, abgeschätzt werden. Die Abschätzung besitzt aber nur einen Gültigkeitsbereich für Verpressmengen zwischen 1 – 25 l/min. Entsprechend lassen sich daraus Durchlässigkeiten (k_f -Werte) von 2×10^{-5} bis 2×10^{-8} [m/s] berechnen. Wenn das Gebirge gar kein Wasser aufgenommen hat, (Verpressmenge 0) ist erfahrungsgemäß der k_f -Wert sehr viel geringer als $2,0 \times 10^{-8}$ m/s.

5.6.5 Verfahren zur Beurteilung und Überwachung des hydraulischen Strömungs- und Transportprozesse

5.6.5.1 Peclet-Zahl-Analyse

Die Peclet-Zahl (Pe) kann als Kriterium zur Beurteilung des Transportprozesses herangezogen werden. Welcher Transport dominiert kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

- Pe < 1 = ein überwiegend diffusionsdominierter Transportprozess
- Pe > 1 = Advektion prägt den Transportprozess.

Die Peclet-Zahl kann über hydraulische Transportparameter wie folgt berechnet werden:

$$Pe = \frac{v_f \times \Delta l}{n \times D_e}$$

mit

- v_f : spezifischer Fluss (Darcy-Fluss) [m/s]
- Δl : Transportpfadlänge [m]
- n: Porosität [dimensionslos]
- D_e : Diffusionskonstante [m²/s]

Durch kontinuierliche oder regelmäßige Wiederholungsmessungen können langfristige Änderungen von Wasserbewegungen in Richtung und Geschwindigkeit erkannt und beobachtet werden.

5.6.5.2 Hydraulische Charakterisierung von Auflockerungszonen mit Hilfe eines Oberflächenpackersystems

Im internationalen, interdisziplinären Forschungsprojekt FEBEX wurde von der BGR eine in-situ-Methode zur Charakterisierung von Auflockerungszonen erprobt und weiterentwickelt. Diese Methode basiert auf der Verwendung eines Oberflächenpackersystems zur hydraulischen Charakterisierung von Auflockerungszonen.

5.6.5.3 Hydraulische Crosshole-Tests

Hydraulische Crosshole-Tests wurden im Felslabor Mont Terri zur Charakterisierung der Durchlässigkeit der Auflockerungszone durchgeführt. Mit diesen Messungen kann beurteilt werden, inwieweit die axiale effektive Durchlässigkeit aufgrund der Vernetzung der induzierten Risse über größere Distanzen hinweg sich von der lokal gemessenen Durchlässigkeiten unterscheidet.

5.6.5.4 Positronen-Emissions-Tomographie

Die Positronen-Emissions-Tomographie, Abkürzung PET, ist ein bildgebendes Verfahren, bei dem Schnittbilder von Bohrkernen erzeugt werden, die vorher von einem speziellen Tracer durchflossen wurden. Als Tracer werden Radionuklide verwendet, die Positronen emittieren (Betastrahlung). Bei der Wechselwirkung eines Positrons mit einem Elektron im Bohrkern werden zwei Photonen in genau entgegengesetzte Richtungen ausgesandt. Ringförmig um den Bohrkern angeordnete Detektoren registrieren die Photonen. Das Prinzip der PET-Untersuchung besteht darin, Koinzidenzen zwischen je zwei genau gegenüberliegenden Detektoren aufzuzeichnen. Aus der zeitlichen und räumlichen Verteilung der registrierten Ereignisse wird auf die räumliche Verteilung des Radiotracers im Inneren des Bohrkerns geschlossen und eine Serie von Schnittbildern errechnet. Die räumliche Geschwindigkeitsverteilung des Wasserflusses und des Transportverhaltens gelöster Schadstoffkomponenten werden im Tomogramm dargestellt, aus dem die Verteilung von Modellparametern mit einer räumlichen Auflösung von 3 mm quantitativ ermittelt werden kann.

5.7 Hydrochemie

Die Hydrochemie beschreibt und untersucht die Inhaltsstoffe der wässrigen Phase in den Poren und Klüften des Gesteins. Die chemischen Eigenschaften des Grundwassers (insbesondere Eh und pH) regeln die physikalische Bewegung von Radionukliden gebunden und daher ist es wichtig, die chemischen Parameter zu kennen. Laut RWMC (2005) besteht Untersuchungsbedarf hinsichtlich der Messtechnik für die chemischen Parameter im Grundwasser, denn bisher werden in keinem Untertagelabor kontinuierliche Messungen dieser Parameter durchgeführt.

Neben dem der Schwerkraft unterliegenden Grundwasser, findet sich in den Gesteinen auch Porenwasser. Beim Porenwasser werden unterschiedliche Typen unterschieden. Beispielsweise werden in Tonsteinen folgende Typen differenziert:

- freies Porenwasser, das nicht durch Mineraloberflächen und adsorbierte Kationen beeinflusst wird.
- extern gebundenes Porenwasser (äußeres Schichtwasser), das in die elektrostatischen Doppelschichten der Tonmineraloberflächen eingebunden ist.
- intern gebundenes Porenwasser (Zwischenschichtwasser), das sich strukturell in der Schicht zwischen den Schichtpaketen – insbesondere in Smektiten findet.

Die Abbildung 5-12 zeigt schematisch die verschiedenen Porenwasserarten eines Tonsteins.

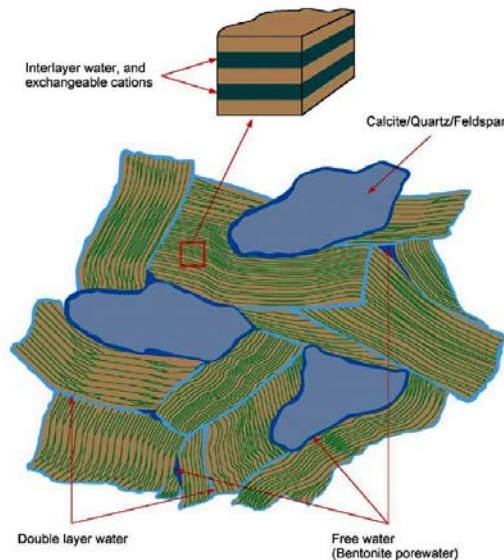


Abbildung 5-12: Schematische Darstellung von freiem und gebundenem Porenwasser von Tonsteinen (Bradbury & Baeyens 2002)

Die Beschaffenheit des Poren- und auch des Grundwassers wird weitgehend von der Zusammensetzung sowie dem Aufbau und den Eigenschaften des Untergrundes bestimmt. Die chemische Beschaffenheit der Wässer beeinflusst die Löslichkeit der Radionuklide. Ein günstiger Chemismus führt zur Ausfällung und somit zur Immobilisierung verschiedener Radionuklide. Zusätzlich können aus der chemischen Zusammensetzung der Porenwässer Informationen über den dominierenden Stofftransport (diffusiv oder advektiv) im Wirts- und Nebengestein abgeleitet werden, da z. B. durch isopenhydrologische Untersuchungen Aussagen über deren Alter, Herkunft, Genese und Dynamik bzw. Verweilzeit im Untergrund getroffen werden können. Die Zusammensetzung beeinflusst entscheidend die gewählten Transportparameter der Modellierung, die den Radionuklidtransport unter Annahme von verschiedenen Szenarien im Nah- und Fernfeld des Endlagers beschreibt.

Zur Vergleichbarkeit von Untersuchungen werden anhand der Porenwässer die sog. Referenzwässer definiert. Mit den Referenzwässern erfolgen Bestimmungen der Radionuklidmobilisierung und -immobilisierung, der Behälterkorrosion und der Wechselwirkungen mit den technischen Barrieren und des Nuklidtransportes im Fernfeld des Endlagers.

5.7.1 Beprobung

Die Ermittlung und Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit erfordert stets die Entnahme von Grundwasserproben, da für den größten Teil der zu messenden physikalischen und chemischen Parameter derzeit noch keine in-situ Messungen möglich sind (Barczewski, 1997). Die Beprobung von Aquiferen erfolgt durch vielfach getestete, konventionelle Verfahren, wie z. B. durch Einfachpacker-Kurz- und Doppelpacker-Tests oder durch Wasserprobennehmer (fluid sampler). Entsprechend dem Ansatz des AkEnd (2002) sind als

einschlusswirksamer Gebirgsbereich nur deutlich diffusionsdominierte Tonsteinvorkommen mit Durchlässigkeitsbeiwerten von etwa $<10^{-12}$ m/s geeignet bzw. als „günstig“ anzusehen. Die Grundwasserflüsse sind hier sehr gering und eine Beprobung für die chemische Analytik sehr schwierig. In Altmaier et al. (2000) wurde festgestellt, dass alle Methoden zur Probenahme aus Festgesteinskörpern die geochemischen Verhältnisse nachteilig beeinflussen. Zur Zeit wird ein Verfahren, bestehend aus einer Kombination aus Bohrlochsickerwasseranalysen, Auspressversuchen und geochemischen Modellrechnungen, entwickelt, um das Porenwasser geochemisch zu beschreiben.

Bei der Charakterisierung des In-situ-Porenwassers muss zwischen der Bestimmung von freien und kontrolliert gelösten Stoffen unterschieden werden (NAGRA 2002).

Bei freien Stoffen handelt es sich im Wesentlichen um die Anionen Chlorid, Brom und Sulfat, deren Konzentration zu keiner Zeit signifikanten Beeinflussungen durch lokale Reaktionen mit dem Gestein unterworfen ist. Die Bestimmung der freien Stoffe erfolgt anhand:

- von Auspressversuchen unter hohen Drücken (squeezing),
- der Zusammensetzung wässriger Auszüge (aqueous leaching) sowie
- von Daten, die von den ermittelten Porositäten abgeleitet wurden.

Bei den Auspressversuchen unter hohen Drücken kann eine Beeinflussung des Porenwassers durch eine Membranfiltration und der damit verbundenen selektiven Zurückhaltung von Anionen (z. B. von Chlorid) erfolgen. Weiterhin muss bei Auspressversuchen berücksichtigt werden, dass in den Tonen gebundenes Zwischenwasser freigesetzt werden kann.

Die Konzentrationen von kontrolliert gelösten Stoffen werden durch Wechselwirkungen mit dem Gestein bestimmt. Die gelösten Kationen und die Komponenten des Karbonatsystems werden als kontrollierte Stoffe bezeichnet. Am Gesteinsmaterial selbst kann die Konzentration von Kationen im Porenwasser nicht ermittelt werden. Gründe hierfür sind:

- die schnelle Reaktionskinetik des Karbonatsystems,
- der Kationenaustausch auf den Tonmineraloberflächen und
- die Sensitivität dieser Reaktionen bezüglich Veränderungen der Umgebungsbedingungen.

Eine Konzentrationsangabe ist nur möglich, wenn die thermodynamischen Grundlagen der vorkommenden Mineralphasen, insbesondere vom Karbonatsystem, bekannt sind sowie die Kationenaustauschreaktionen experimentell am Wirtsgestein bestimmt wurden.

5.7.2 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit (Lf) gibt die Fähigkeit des Wassers an, elektrischen Strom zu leiten. Reines Wasser oder Lösungen von Nichtelektrolyten (z. B. organische Verbindung)

sind elektrisch nicht leitfähig, da sie nur wenige Ionen enthalten. Durch Dissoziation in wässriger Lösung entstandene Ionen machen die Lösung elektrisch leitfähig. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für die Gesamtheit der in einer Probe gelösten Ionen bzw. für den Mineralisationsgrad des Wassers.

Die elektrische Leitfähigkeit einer Wasserprobe ergibt sich aus der Widerstandsmessung zwischen Elektroden. Die Einheit der Leitfähigkeit ist Siemens pro Meter [S/m].

Da die Ionenbeweglichkeit mit steigender Temperatur zu-, mit fallender abnimmt, ist die Leitfähigkeit temperaturabhängig. Mit Temperaturkorrekturfaktoren werden die Messwerte korrigiert. Dazu wurden früher Umrechnungstabellen verwendet. Mittlerweile ist die geräteinterne Umrechnung der Messwerte auf eine Referenztemperatur von 25 °C üblich.

5.7.3 pH-Wert

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration (Höltling 1996). Die Messung des pH-Wertes erfolgt elektrometrisch mit einer Wasserstoffelektrode, indem die Potentialdifferenz zwischen der Wasserstoffelektrode und der Lösung bestimmt wird. Der pH-Wert kann auch durch einen Farbvergleich bestimmt werden. Diese Methode beruhen auf einer chemischen Reaktion und ist daher nicht für die kontinuierliche Langzeitüberwachung geeignet (RWMC 2005).

Die pH-Werte von natürlichen Grundwässern liegen im neutralen bzw. sehr schwach sauren oder alkalischen Bereich. Unterschiedliche pH-Werte in natürlichen Wässern sind häufig auf unterschiedliche Kohlensäuregehalte zurückzuführen. In Wasser gelöste Stoffe ändern oft den pH-Gehalt, indem sie mit einigen der dissoziierten Ionen eine Verbindung eingehen und so das Gleichgewicht verschieben. Deshalb sind niedrige pH-Werte oder stark von den natürlichen pH-Werten abweichende pH-Werte Anzeichen von Kontaminationen. Die Löslichkeiten der meisten Ionen sind pH-abhängig.

5.7.4 Redoxpotenzial

Das Redoxpotenzial (E_h) beschreibt das Konzentrationsverhältnis von oxidierten und reduzierten Inhalten und somit die elektrochemischen Bedingungen in der wässrigen Lösung. Natürliche Wässer haben einen häufig typische Redoxpotenziale auf. Grundwässer sind häufig nur schwach konzentriert, weshalb sich für die Anwendung der Messung von Redoxpotenzialen bei geohydrochemischen Untersuchungen und ihrer Interpretation doch einige Schwierigkeiten ergeben (Höltling 1996).

Die regelmäßige Messung des Redoxpotenzials in Oberflächen- und Grundwasser dient der Überwachung der Wasserqualität.

Die Redoxmessung erfolgt mit einer elektrochemischen Messkette aus einer inerten Metallelektrode und einer Bezugselektrode aus Silber, Silberchlorid oder Kalomel. Das gemessene

Redoxpotenzial wird aus historischen Gründen auf das Potenzial der Wasserstoffelektrode mit einem Druck von $p = 10^5$ Pa und einer H^+ -Aktivität von 1 bezogen (Hölting 1996). Die Einheit des Redoxpotenzials ist das Volt.

Die Potenziale natürlicher Wässer können zwischen $-0,3$ V (stark reduzierendes Milieu) und $0,800$ V (stark oxidierendes Milieu) variieren. Mit steigenden Redoxpotenzial sinkt der pH-Wert um etwa $0,59$ mV pro pH-Einheit. Im sauerstoffreichen Milieu werden aufgrund vieler oxidierender Verbindungen (Fe- und Mangan-Oxide, Nitrat, Sulfat) hohe Redoxpotenziale gemessen. Im reduzierenden Milieu sind Fe^{2+} , Mn^{2+} sowie organische Substanz im Wasser gelöst.

6 Zusammenfassende Analyse

6.1 Aktueller Stand der Endlagerüberwachung und erkennbare Defizite

Die Länder, welche die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen verfolgen, sind sich einig über die Wichtigkeit der Endlagerüberwachung für die Beschreibung des Referenzzustands, für das Fällen von Entscheidungen im stufenweisen Endlagerprogramm, die Sicherstellung der Betriebssicherheit, für die Safeguards und die Überprüfung von Modellannahmen. Leicht Unterschiedliche Auffassungen bestehen jedoch bei der Bewertung der Rolle der Endlagerüberwachung bei dem Nachweis der Endlagerentwicklung und Langzeitsicherheit (EC 2004).

Die gegenwärtig laufenden Endlagerüberwachungsprogramme sowie die Planungen für zukünftige Überwachungen unterscheiden sich von Fall zu Fall, da auch die Endlagerprogramme unterschiedlich sind. Die Rolle der Überwachung innerhalb des Endlagerprogramms und innerhalb des Sicherheitsnachweises ist unterschiedlich. Entsprechend ist der Umfang der Messungen verschieden. Der Aufwand bei der Endlagerüberwachung sollte darauf beschränkt werden, was wirklich zur Wissenserweiterung, für den Entscheidungsprozess oder den Langzeitsicherheitsnachweis notwendig ist (EC 2004).

Es besteht bereits Jahrzehnte lange Erfahrung im Bereich der in-situ-Messung im Zusammenhang mit radioaktiven Abfällen, z. B. in Untertagelabors, im Rahmen von Forschungsprojekten und in bereits existierenden Endlagern. Dagegen ist die Erfahrung auf dem Gebiet der Überwachung von tatsächlichen Endlagern für hoch radioaktive Abfälle vergleichsweise gering, da solche Endlager sich gerade in der Planungs- oder höchstens in der Errichtungsphase befinden. Die gegenwärtig verfügbare Erfahrung umfasst im Wesentlichen die Überwachung während der Standorterkundung und Errichtung des Endlagers. Dabei kommt konventionelle Messtechnik zum Einsatz.

Für die Überwachung in der langen Betriebsphase, in unzugänglichen Endlagerteilen und in der Nachbetriebsphase, werden langlebige Messsysteme benötigt. Mangels Erfahrung auf diesem Gebiet ist es schwierig, die in den meisten Endlagerüberwachungsprogrammen aufgestellte Anforderung, dass möglichst erprobte und bewährte Messsysteme in der Endlagerüberwachung zum Einsatz kommen sollen, zu erfüllen.

Ein wichtiges Forschungsgebiet ist daher der Nachweis der Lebensdauer der Messsysteme. Vielfach ist die Lebensdauer der Geräte gar nicht bekannt. Es gibt auch keine Standards bezüglich des Nachweises der Lebensdauer für Messsysteme für die Endlagerüberwachung. Daher ist es wichtig, dass in Untertagelabors wichtige Entwicklungen gemacht und unter realen Bedingungen umgesetzt und erprobt werden. Ein solches Projekt wird z. B. von der ANDRA gerade durchgeführt (Mayer 2008). Da Untertagelabors einen Vorlauf zum eigentlichen Endlagerprogramm haben, kann dort am ehesten die Langzeitverlässlichkeit der Messtechnik nachgewiesen werden. Die parallele Erprobung von Messsystemen, um auf dem Stand der Messtechnik zu bleiben oder die Summe der Erfahrungen mit dem Messsystem zu erhöhen, ist notwendig. Jedoch steht die mehrere Jahrzehnte lange Dauer der einzelnen Phasen eines Endlagerprogramms und der ggf. gewünschten Überwachung in der

Nachbetriebsphase nicht im Verhältnis zum Fortschreiten des Standes der Technik. Die Ausreifung der Messtechnik wird dem Stand der Technik immer hinterherhinken.

Als Grundlage für die Endlagerüberwachung wäre es wünschenswert, die verfügbare Messtechnik komplett zusammen zu stellen, um den Stand der Technik umfassend zu beschreiben, der die Ausgangsposition sowohl für das Messprogramm als auch für Innovationen darstellt. Gleichzeitig müsste ein Vergleich und eine Bewertung der verfügbaren Messtechnik erfolgen. Dieses ist jedoch angesichts der Vielzahl der verfügbaren Messtechnik und der Hersteller sehr zeitaufwendig. Erschwerend kommt hinzu, dass in den verschiedenen Endlagerprogrammen (bzw. Wirtsgesteinen) und in den verschiedenen Phasen der Endlagerüberwachung unterschiedliche Messsysteme eingesetzt werden.

Vor diesem Hintergrund kann die Auflistung und Beschreibung der Messverfahren in dieser Studie nicht als vollständig und umfassend angesehen werden, sondern eher als Ausgangsbasis für die Erstellung eines detaillierten Mess- und Überwachungsprogramms, das im Rahmen eines strategischen Rahmenkonzeptes je nach Wirtsgestein, Endlagerkonzept und regulatorischen Anforderungen aufzustellen ist.

Ein weiteres Problem, das angegangen werden muss, ist die Beständigkeit der Messsysteme in der Endlagerumgebung. Abgesehen von faseroptischen Messsysteme weisen die meisten Sensoren, Datenübertragungskabel und Datenerfassungsstationen metallische Bestandteile auf, die in einer wasserhaltigen Umgebung durch Korrosion schnell ihre Funktionsfähigkeit verlieren können. In Ländern, die die Endlagerung in wasserhaltigen Tonsteinen oder kristallinem Gestein verfolgen, kommt diese Problematik zum Tragen. Dagegen ist Korrosion im Salzgestein, wo mit einer Porosität unter 2 % zu rechnen ist, nicht zu erwarten. Nicht nur Wasser kann die Messsysteme angreifen, sondern auch zutretende Laugen oder Gase, die vom Abfall selbst produziert werden können. Die gesamten Einflüsse auf die Messtechnik müssen beschrieben werden und es gilt, ihre Auswirkungen zu erforschen.

Weiterhin ist es noch Gegenstand der Forschung, welche Parameter wie oft gemessen werden müssen. Dies ist direkt abhängig vom Wirtsgestein. Ist der Messbedarf identifiziert, besteht hier sicherlich noch der Bedarf, der Optimierung der Messsysteme unter Berücksichtigung des Endlagerbetriebs, sowohl hinsichtlich der Messanordnung im Endlager, als auch der Messerfassung, der Instandhaltung und der Wiederholungs- und Datenübertragungsraten. Die Maßgaben für die Optimierung müssen noch herausgearbeitet werden.

Bei der Beschreibung des Referenzzustands besteht die Anforderung, die zulässigen Wertebereiche für Messwerte (Erwartungswerte) festzulegen. Ausreißer und Trends sollen in Messreihen identifiziert werden und die entsprechenden Parameter sollen so lange gemessen werden, bis die Ursache für den Trend bzw. für den Ausreißer untersucht ist. Zur Identifizierung von Trends und Ausreißern gibt es bislang keine einheitlichen Vorgehensweisen. Hier wäre es sinnvoll, die verfügbaren statistischen Methoden zu prüfen und zu vergleichen. Es muss zudem die Frage geklärt werden, unter welchen Bedingungen ein Trend in der Messreihe als ausreichend untersucht und erklärt gilt.

Abgesehen vom WIPP¹⁰-Überwachungsprogramm besteht keine Erfahrung bei der Festlegung der Erwartungswerte und den entsprechenden Maßnahmen, bei Nichteinhaltung der Messwerte. Ein anerkanntes standardisiertes Vorgehen auf internationaler Ebene, z. B. auf EU-Ebene, wäre wünschenswert, um die Erwartungswerte zu untermauern. Müssen für alle Messparameter Erwartungswerte und Maßnahmen festgelegt werden, oder sollen Maßnahmen nur für diejenigen Messparameter festgelegt werden, die im Sicherheitsnachweis eine gewisse Rolle spielen, wie im WIPP-Überwachungsprogramm. Mit Fortschreiten des Wissensstands besteht die Möglichkeit, dass nicht sicherheitsrelevante Messparameter an Bedeutung gewinnen und ggf. in die Sicherheitsbewertung aufgenommen werden müssen.

Eine weitere Herausforderung, ist die Herstellung der Kompatibilität zwischen verschiedenen Messerfassungs- und -auswertungsprogrammen. Auch bezüglich der Datenbank, in die alle Daten eingehen und die künftigen Generationen dienen soll, besteht noch Forschungsbedarf. Wie lässt sich eine solche Datenbank so gestalten, dass sie verschiedene Arten von Daten – möglichst automatisch – erfassen kann, und dabei einfach und verständlich aufgebaut bleibt? Gleichzeitig sollte sich die Datenbank mit dem Stand der Technik entwickeln können.

Weitere Forschungsaufgaben sind:

- allg. Entwicklung von langlebigen und robusten Messinstrumenten für den Einsatz in der Endlagerüberwachung, Testen in Untertagelabors,
- Untersuchung der Langzeitgerätedrift konventioneller, bewährter Messtechnik,
- langfristige Energieversorgung von Sensoren (in nicht zugänglichen Endlagerteilen),
- Datenübertragung über große Entfernungen (über mehrere Sohlen oder bis zur Tagesoberfläche) ohne den Endlagerbetrieb zu stören,
- Steuerung von Messgeräten, die nicht zugänglich sind, um beispielsweise eine Nachkalibrierung durchzuführen.
- Nicht-intrusive Messtechnik:
 - langlebige Sensoren/Messgeräte, die keine Instandhaltung benötigen,
 - Datenübertragung ohne die Integrität der geotechnischen Barrieren zu beeinträchtigen.

Chemische Sensoren sind für die Langzeitüberwachung nicht geeignet, da die Sensoren oft auf einer irreversiblen oder nur teilweise reversiblen chemischen Reaktion beruhen, so dass sich die Sensoren verändern und damit verschleifen; hier besteht Forschungsbedarf (RWMC 2005). Chemische Sensoren können beispielsweise für die Messung des pH-Wertes oder des Redoxpotenzials eingesetzt werden. Es sollte untersucht werden, ob die kompakten und energieeffizienten Sensoren für die Untersuchung von oxidierenden/reduzierenden Milieus, die für den Einsatz im Weltraum, in der Tiefsee oder in der Medizin entwickelt wur-

¹⁰ WIPP: Waste Isolation Pilot Plant, ein Endlager im Salz für Alpha-Strahler aus der Nuklearwaffenindustrie in den USA

den, in Endlagern verwendet werden können. Eine weitere Möglichkeit stellen optische Sensoren dar, die chemische Parameter, die Temperatur sowie die Verformung messen können.

Es ist allgemein zu prüfen, ob die in anderen Bereichen, wie Verkehrs- und Eisenbahntunneln, Dämmen, Weltraumforschung oder Bergbau entwickelten Messtechnik-Innovationen, auf die Überwachung von Endlagern übertragen werden können. Beispielsweise gibt es viele Forschungsprojekte zum Thema untertägige Kommunikation im Kohlebergbau in China.

6.2 Stand der Diskussion zur Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase

Die Endlagerprogramme in den unterschiedlichen Ländern bauen auf die passive Sicherheit des Endlagers nach seiner Schließung. Dabei werden unterschiedliche Ansätze hinsichtlich des Zeitpunkts der Schließung verfolgt. Beispielsweise ist in der Schweiz nach Beendigung des Endlagerbetriebs eine längere Beobachtungsphase vorgesehen, in Frankreich ist eine längere Offenhaltungsphase vorgesehen, in der die Rückholung der Abfälle möglich sein soll. Vor der endgültigen Schließung eines Endlagers wird die Überwachung ohnehin fortgesetzt.

Fast alle Endlagerprogramme sehen vor, dass die Endlagerüberwachung nach Schließung des Endlagers fortgesetzt werden kann. Das wichtigste Argument ist, dass die die Entwicklung des Endlagers bestätigenden Messdaten das Vertrauen in die Endlagerung erhöhen. Das „Ins Auge fassen“ einer Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase hat den Effekt, dass gegenwärtig die Akzeptanz eines Endlagerprogramms steigt. Es wird erwartet, dass die Überwachung keine auffälligen Messwerte ergeben wird.

Die Gesellschaft soll nach der Schließung über die Fortsetzung der Endlagerüberwachung entscheiden, d. h. dass künftige Generationen erst diese Entscheidung zu fällen haben. Unklar ist, unter welchen Maßgaben künftige Generationen diese Entscheidungen treffen sollen bzw. können. Es ist vorgesehen, alle bei der Endlagerüberwachung erhobenen Messdaten in einer Datenbank zusammenzutragen, die für künftige Generationen gepflegt wird, so dass die Generation, die die Entscheidung über die Endlagerüberwachung fällen muss, die Informationen in der Datenbank als Grundlage für die Entscheidung verwenden kann. Dabei muss sichergestellt werden, dass künftige Generationen die Datenbank tatsächlich erhalten, sie nutzen und verstehen können.

An Überwachungsmethoden für die Nachbetriebsphase wird beispielsweise die seismische Erkundung oder die Fernerkundung vorgeschlagen (z. B. in der Schweiz). Messungen innerhalb des Endlagers sind nur unter der Maßgabe möglich, dass die Integrität der geotechnischen Barrieren nicht beeinträchtigt wird. Außerdem muss das Problem der Energieversorgung und Datenübertragung vorher gelöst werden. Es gibt noch keine konkreten Messprogramme für die Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase.

In den meisten Ländern ist der Staat verantwortlich für die Entscheidung über die Schließung des Endlagers. In dem schwedischen Endlagerprogrammen ist noch nicht festgelegt, wer für die Überwachung in der Nachbetriebsphase die Verantwortung übernimmt, während im

Schweizer Endlagerprogramm vorgesehen ist, dass die weitere Umweltüberwachung vom Bund durchgeführt wird.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Zeitbereiche eines Endlagerprogramms unter Berücksichtigung der Option einer Rückholbarkeit (nach Grupa et al. 2001)	16
Tabelle 2-2:	Überblickhafte Zusammenstellung potenziell überwachungsrelevanter Parameter und Prozesse in einem Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle (reproduziert nach IAEA (2001))	18
Tabelle 2-3:	Überwachung der für die Entscheidungsunterstützung relevanten Schutzziele	23
Tabelle 3-1:	Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine (BGR, 2007)	30
Tabelle 3-2:	Endlagerprogramme in verschiedenen Ländern: Stand des Endlagerprogramms und der Endlagerüberwachung (in Anlehnung an RWMC (2001))	33
Tabelle 3-3:	Safeguards-Überwachungsprogramm in Finnland	48
Tabelle 3-4:	Im Onkalo-Überwachungsprogramm verwendete Messtechnik für die Überwachung der Gebirgsmechanik	50
Tabelle 3-5:	Mögliche Messparameter in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms (aus Bäckblom & Almén (2004))	56
Tabelle 3-6:	Auswahl an geologischen Parametergruppen und zugehörigen Parametern, die in verschiedenen Phasen der Standorterkundung zu messen sind	57
Tabelle 4-1:	Beispielhafte Umweltbedingungen im Nah- und Fernfeld eines Endlagers in 1000 m Tiefe (verändert nach RWMC, 2005)	68
Tabelle 4-2:	In EC (2004) vorgeschlagenes Informationsblatt Messtechnik, verändert	71
Tabelle 4-3:	Geeignete Sensoren für ausgewählte Messgrößen	74
Tabelle 5-1:	Eigenschaften der Landsat-Satellitenaufnahmen (Quelle: http://www.sbg.ac.at/geo/student/fernerkundung/index.htm)	86
Tabelle 5-2:	Zuordnung der Landsat TM-Spektralkanäle zu den Eigenschaften an der Erdoberfläche (Quelle: http://www.sbg.ac.at/geo/student/fernerkundung/index.htm)	86
Tabelle 5-3:	Gängige geophysikalische Messmethoden und ihre Anwendungsgebiete (Knödel et al. 1997)	91
Tabelle 5-4:	Lithologische Aussage von Bohrlogs (Jankowsky, 1983)	92
Tabelle 5-5:	U-, Th- und K-Gehalte einiger Minerale sowie Wertebereiche der Gamma-Aktivität in API-Einheiten (Fricke & Schön 1999)	94
Tabelle 5-6:	Wasserstoffindex HI (hydrogen index) verschiedener Gesteinsbestandteile (Fricke & Schön (1999))	97

Tabelle 5-7:	Dichte und photoelektrischer Faktor (Pe) von verschiedenen Sedimentgesteinen nach Fricke & Schön (1999) sowie Bender (1985).	99
Tabelle 5-8:	Mittlere radiale Signaleindringtiefe für sedimentäre Ablagerungen nach NLfB (1986a) und Fricke & Schön (1999)	105
Tabelle 5-9:	Erzielbare Genauigkeit mit Extensometern (Paul & Gartug (1991) in Fecker (1997))	130
Tabelle 5-10:	Eignung von Bohrlochtests für verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte (verändert und ergänzt nach NLfB (1986b), Schneider (1987) und LfU (1991))	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Überblick über generelle Schutzziele und die damit verbundenen Überwachungsaufgaben	13
Abbildung 3-1:	Strategie für die Endlagerüberwachung in der Schweiz (Hugi 2001)	43
Abbildung 3-2:	Endlagerüberwachung: Ziele und Aufgaben (EC (2004), in Anlehnung an Biurrun (2001))	62
Abbildung 5-1:	Bestimmung von Mineralen in Sedimenten durch das Verhältnis von Thorium zu Kalium (Bender, 1985)	95
Abbildung 5-2:	Georadarmessung (Meyer, 2002)	113
Abbildung 5-3:	Prinzip der Gravitationsmessung (Knödel et al., 1997)	118
Abbildung 5-4:	Beispiel für zulässige Temperaturerhöhungen als Funktion von Tiefenlage und Temperaturgradient	120
Abbildung 5-5:	Temperaturmessung in einer Bohrung: Log-Messung (links) und Permanentmessung (rechts)	121
Abbildung 5-6:	Temperatur-Logs zu verschiedenen Standzeiten einer Bohrung nach Beendigung des Bohrvorgangs in reduzierter Darstellung (KTB, 1990)	122
Abbildung 5-7:	Wärmetransportgleichung und auslegungsrelevante Größen	124
Abbildung 5-8:	Prinzip einer Peclet-Zahl-Analyse (Clauser et al. 2002)	126
Abbildung 5-9:	Bestimmung vertikaler Strömungsbewegungen mittels Peclet-Zahl-Analyse am Beispiel einer Bohrung in Deutschland (Clauser et al. 2002)	127
Abbildung 5-10:	Prinzip der Dehnungsmessung mit optischem Sensor (Jobmann, 2000)	132
Abbildung 5-11:	Aufbau eines Pumpversuches am Beispiel Münchehagen I (NLfB 1986b)	138
Abbildung 5-12:	Schematische Darstellung von freiem und gebundenem Porenwasser von Tonsteinen (Bradbury et al. 2002)	144

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002) : Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln, Dezember 2002
- Altmaier et al. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung, M. Altmaier, V. Brendler, D. Bosbach, B. Kienzler, Chr. Marquardt, V. Neck, A. Richter, Abschlussbericht, Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe
- ANDRA (2001) : Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse. [Partie A]
- ANDRA (2005a): Dossier 2005 : Argile, Synthèse de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse, ANDRA, 2005
- ANDRA (2005b): Dossier 2005 : Granite, Synthèse de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse, ANDRA, 2005
- Bäckblom & Almén (2004): Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel. G. Bäckblom und K.-E. Almén. SKB Rapport R-04-13. SKB, Stockholm
- Barczewski (1997): Tiefenorientierte Grundwasserprobennahme bei der Altlastenerkundung Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS, B. Barczewski, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, S. 1 – 7.
- Barrett & Curtis (1976) : Introduction to environmental remote sensing, E.C. Barrett und L.F. Curtis, Chapman and Hall, London
- Becker (2006) : Leistungsfähige Systembausteine zur Erfüllung der Kommunikationsanforderungen, F. Becker, Glückauf Nr. 11, 07.11.2006, 142. Jahrgang, VGE Verlag GmbH, Essen
- Bender (1985): Angewandte Geowissenschaften, Band 2: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. Bender, F. (Hrsg.) Enke, Stuttgart, 766 S.
- BGR (1990): Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben; Zusammenfassender Bericht Stand 01.01.1990, Archiv Nr. 108 880, Hannover
- BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland, Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, BGR, Hannover/Berlin, April 2007
- Biurrin et al. (2001): *Repository monitoring in Germany*, E. Biurrin, G. Bundrock, J. Engelhard, B. Horlbeck, M. Jobmann, L. Teichmann, , C. Walther, J. Weidenbach, Internal Report, 107 pages, editor: M. Jobmann, DBE, Peine, Germany.
- BMU (2008): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Entwurf, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Raktorisicherheit, Bonn, 29. Juli 2008

- Bodenez et al. (2008): Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. P. Bodenez, J. Rieu, J.C. Niel, Autorité de sûreté nucléaire. Version du 12/02/2008.
- Bradbury & Baeyens (2002): Porewater chemistry in compacted resaturated MX 80 bentonite: Physico-chemical characterisation and geochemical modelling. M.H. Bradbury und B. Baeyens, 02-10, Paul Scherer Institute, Villigen.
- Bredehoeft & Papadopoulos (1980): A method for determining the hydraulic properties of tight formations. J.D. Bredehoeft und S. Papadopoulos. Water Resources Research, Vol. 3, No1, S. 263 - 269.
- Clauser et al. (2002): Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe, C. Clauser, F. Höhne, A. Hartmann, V. Rath, H. Deetjen, W. Rühaak, R. Schellschmidt und A. Zschocke, RWTH Aachen, GGA Hannover, erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz
- Cooper et al. (1967): Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. H.H.Cooper, J.D. Bredehoeft und I.S.Papadopoulos, Water Resourc. Research, Vol. 3, 1, 263-269, Washington D.C.
- DBE (2007): Endlager für radioaktive Abfallstoffe Morsleben, Geomechanische Betriebsüberwachung 2007, Großräumige Überwachungsmessungen. Th. Bauer, J. Proff, C. Rohr. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE). Bericht. Peine. 2007
- DBE (2008) : Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben – Bergbauliche Gefahrenabwehrmaßnahme Zentralteil (bGZ), Beweissicherung, Allgemeine Informationen
- DIN 1319-1 Grundlagen der Messtechnik. Oktober 2005
- DIN 18710-4: Ingenieurvermessung, Teil 4: Überwachung, September 2010
- DIN 18716-3: Photogrammetrie und Fernerkundung, Teil 3: Begriffe der Fernerkundung, Juli 1997
- EC (2004): Thematic Network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal of radioactive waste – Final report, European Commission project report EUR 21025 EN.
- EKRA (2000): Disposal Concepts for Radioactive Wastes, Final Report, Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste, Swiss Federal Department for the Environment, Transport, Energy and Communication, Bern/Switzerland.
- Fecker (1997): Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels. E. Fecker. Enke, Stuttgart
- Fricke & Schön (1999): Praktische Bohrlochgeophysik. S. Fricke, J. Schön, Stuttgart: Enke im Georg Thieme Verlag, 1999
- Grupa et al. (2000): Results of the Concerted Action on the Retrievability of Long Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories. Final Report. EUR 19145. Grupa, J. B., Dodd, D. H., Hoorelbeeke, J. P., Ziegenhagen, J., Santiago, J.-L., Zuidema, P., Crossland, I., Vrijen, J., Vira, J., Volckaert, G., Papp, T. European Commission. 2000

- Grupa et al. (2001): Results of the Concerted Action on the Retrievability of Long Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories. Grupa, J. B., Hoorelbeeke, J. P., Ziegenhagen, J., Santiago, J.-L., Zuidema, P., Crossland, I., Vrijen, J., Vira, J., Volckaert, G., Papp, T.. WM'01 Conference, 2001, Tucson, Arizona, USA
- Hanna (1985): Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech Publications. Rockport, MA. 1985
- Heitfeld & Koppelberg (1981): Durchlässigkeitsuntersuchungen mittels WD-Testen. K.H. Heitfeld und W. Koppelberg. Zbl. Geol. Paläont., Teil 1, Heft 5/6, Stuttgart.
- Höltling (1996): Hydrogeologie, Eine Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, B. Höltling, Springer, 2001
- Horner (1951): Pressure build-up in wells. D.R. Horner Proc. 3rd World Pet. Cong. The Hague, Sec. II, 503 – 523.
- Hoth et al. (2005): Tonstein-Formationen – eine mögliche Alternative für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland? Hoth, P., Wirth, H., Krull, P., Olea, R., Feldrappe, H., Reinhold, K., Z. geol. Wiss., Berlin 33 (2005) 4/5: 209 – 241, 23 Abb., 1 Tab.
- Hugi et al. (2001): Surveillance of a deep geological repository for radioactive waste, Hugi, M., Zuidema, P., Fritschi, M., Nold, A., Kowalski, E. WM'01 Conference, February 25 – March 1, 2001, Tucson, AZ
- Hurtig & Großwig (2000): Faseroptische Temperaturmessungen in Bohrungen - Meßmethoden und Ergebnisse. E. Hurtig und S. Großwig. In: Bücken, C. (Ed.), Bohrlochgeophysik und Geosteinsphysik, Mitteilungen Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, Sonderband III/2000: 23-28. 2000
- IAEA (1995): The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2001): Monitoring of geological repositories for high-level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208. ISSN-1011-4289.
- Jankowski (1983): Das Abbild der Gesteine in Bohrlochmessungen und Seismik: Unterschiede und Verknüpfungen. W.J. Jankowski. 3. Mintrop-Seminar 1983. Bohrlochmessungen und seismische Interpretation: 9-32, 6 Abb.. Celle
- Jessberger (1995): Gefrierschächte Gorleben. – Beiträge zum Symposium Gefrierschächte Gorleben in Bochum 21-22 September 1994, Jessberger, H.L. (Hrsg.), A.A. Balke-ma, Rotterdam. (Blatt 5)
- Jobmann et al. (2000): New monitoring methods for operational safety requirements based on fiber optic technology, Jobmann, M., Fischer, S., Voet, M., 2000, Distec'2000, International Conference on Radioactive waste disposal, Berlin, Germany.
- Jobmann et al. (1999): Draft operational safety monitoring concept for a German deep geological repository. M. Jobmann, E. Biurrun, M. Voet. 5th Internal Workshop on Design and Construction of Repositories. 1999
- Knödel et al. (1997): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Bd. 3: Geophysik. Knödel, K., Krummel, H. & G. Lange (Hrsg.): Berlin. Heidelberg. S. 511-599.

- Kreuzer (2007): Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. Manfred Kreuzer. HBV, Darmstadt
- KTB (1990): KTB Report 90-6a, Langzeitmess- und Testprogramm in der KTB-Oberpfalz VB. Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 10). K. Bram, J.K. Draxler, W. Kessels, G.Zoth. Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.), 1990
- Langguth & Voigt (2004): Hydrogeologische Methoden, H.-R. Langguth, R. Voigt, Springer Berlin Heidelberg, 2004
- LfU (1991): Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit, Zentraler Fachdienst Wasser - Boden – Abfall – Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 1991
- Manthei (2007): Schallemissionsmessungen zur Verfolgung von Rissbildung in der Umgebung einer druckbeaufschlagten Bohrung im Salzgestein, Mathei, G., Eisenblätter, J. und Popp, T., 16. Kolloquium Schallemission 2007, Vortrag 02
- Mayer (2008): Andra's monitoring developments programme: National context, potenzial monitoring objectives and first thoughts on monitoring strategies. S. Mayer. Contribution to the *MoDeRn* workshop discussions. 26/02/2008. ANDRA
- Meyer et al. (2002): Georadar – der zerstörungsfreie Blick in den Untergrund: Beispiele aus dem Naturschutzgebiet Zigermoos, Unterägeri/ZG und der Deponie Riet, Winterthur/ZH. E. Meier, P. Staubli, B.U. Müller, J. Stünzi, E. Schubert, D. Dubois. Bull. angew. Geologie. Vol. 1 Nr. 1
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Nagra Technischer Bericht NTB 02-03, Wetztingen/Schweiz
- NASA (2008): Landsat 7 Science Data Users Handbook , National Aeronautics and Space Administration (NASA), Volume: 2008, Issue: 21 October 2008, Publisher: Landsat Project Science Office, Pages: 186
- NLFB (1986a): Tätigkeitsbericht der Arbeitsgemeinschaft Bohrlochmessungen (Bericht 4, Endbericht) – Konzept eines Mess- und Untersuchungsprogramms für die Vor- und Hauptbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms, Archiv Nr. 99 550, Hannover.
- NLFB (1986b): Geowissenschaftliche Vorsorgeuntersuchungen zur Standortfindung für die Ablagerung von Sonderabfällen, Archiv Nr. 92117, Hannover.
- OECD/NEA (1982): Disposal of Radioactive Waste - An Overview of the Principles Involved. 1982
- Okko & Rautjärvi (2006): Evaluation of monitoring methods available for safeguards use at Olkiluoto geological repository. Okko O., Rautjärvi J., Report on Task FIN C 1572 of the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards. STUK-YTO-TR 216. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 2006
- Paul & Gartung (1991): Verschiebungsmessungen längs der Bohrlochachse - Extensometermessungen. A. Paul und E. Gartung. – Empfehlung Nr. 15 des Arbeitskreises 19 -Versuchstechnik Fels- der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Bautechnik, 68: 41-48

- Posiva (2003a): Programme of monitoring at Olkiluoto during construction and operation of ONKALO. POSIVA 2003-05. Posiva Oy, Olkiluoto.
- Posiva (2003b): Baseline conditions at Olkiluoto. POSIVA 2003-02. Posiva Oy, Olkiluoto.
- Posiva (2003c): ONKALO Underground Characterisation and Research Programme (UCRP). POSIVA 2003-03. Posiva Oy, Olkiluoto.
- RWMC (2005): Monitoring of Geological Disposal – Current Status and Technical Possibilities. RWMC-TRE-04004
- Schneider (1987): Durchlässigkeit von geklüftetem Fels – eine experimentelle Studie unter Berücksichtigung des Wasserabpressversuches, H.-J. Schneider, RWTH Aachen.
- Schreiner & Kreysing (1998): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4: Geotechnik, Hydrogeologie, Schreiner, M. und Kreysing, K., BGR, Springer, 1998
- SKI (2002): The Swedish Nuclear Power Inspectorate Regulatory Code: The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Regulations concerning Safety in connection with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear Waste. SKIFS 2002:1. Ingvar Persson (Publisher)
- SKI (2004): The Swedish Nuclear Power Inspectorate Regulatory Code: The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Regulations concerning Safety in Nuclear Facilities. SKIFS 2004:1. Ingvar Persson (Publisher)
- Theis (1935): Relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. C.V. Theis, Trans. Amer. Geophys. Union 2, 519 – 524.
- Wagner et al. (2002): WIPP CASE STUDY - Compliance Monitoring, Passive Institutional Controls, and Record Keeping. Wagner, S., Beauheim, R.L., Pfeifle, T. W., Bethel, A., Sosa-Yates, G., Williams, C.V., Milligan, M. Fox, M., Sandia National Laboratories
- Wieczorek & Rothfuchs (2006): Einsatz und Weiterentwicklung geophysikalischer Mess- und Überwachungsmethoden in Untertagelabors für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. K. Wieczorek und T. Rothfuchs. Messen in der Geotechnik 2006
- Zeh et al. (2002): Faseroptische Bragg-Sensoren zur Dehnungs- und Temperaturmessung. T. Zeh, A. Meixner, A.W. Koch, Chr. Neumann. Tagungsband XVI. Messtechnisches Symposium, 30.09. - 02.10.2002, Universität Kassel. Hrsg.: Wolf-Jürgen Becker, Wolfgang Holzapfel. Aachen: Shaker Verlag, 2002. ISBN 3-8322-0639-6. S. 65 ff.