

**Entwicklung und Umsetzung von
technischen Konzepten für Endlager in
tiefen geologischen Formationen in
unterschiedlichen Wirtsgesteinen**

(EUGENIA)

Synthesebericht

(November 2011)

**Entwicklung und Umsetzung von
technischen Konzepten für Endlager in
tiefen geologischen Formationen in
unterschiedlichen Wirtsgesteinen**

(EUGENIA)

Synthesebericht

Wilhelm Bollingerfehr
Martin Herklotz
Christel Herzog
Michael Jobmann
André Lommerzheim
Eberhard Weiß
Johanna Wolf
Jürgen Ziegenhagen

Jörg Hammer
Jürgen Sönke
Gerhard Mingerzahn

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

November 2011

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1 Zielsetzung der Untersuchungen	19
2 Überblick über international entwickelte Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Gesteinsformationen sowie über Unterschiede der zugrundegelegten Sicherheitskonzepte	21
3 Wirtsgesteinseigenschaften und ihr Einfluss auf die Standortsuche/-erkundung und die Endlagerkonzepte	27
3.1 Einfluss der Wirtsgesteinseigenschaften auf die Standortsuche/-erkundung	27
3.1.1 Steinsalz	28
3.1.2 Tongesteine	30
3.1.3 Kristalline Gesteine	32
3.2 Einfluss der Wirtsgesteinseigenschaften auf die Endlagerkonzepte	35
3.2.1 Steinsalz	36
3.2.2 Tongesteine	37
3.2.3 Kristalline Gesteine	38
4 Standortauswahl und Standorterkundung	41
4.1 Anforderungen und Auswahlkriterien für Endlagerstandorte	41
4.2 Standortsuche und Standortvorauswahl	45
4.3 Beispiele für Standortauswahlverfahren	47
4.3.1 Deutschland	48
4.3.2 Frankreich	52
4.3.3 Schweiz	53
4.3.4 Schweden	55
4.3.5 Finnland	57
4.3.6 USA	58
4.4 Standorterkundung	61
4.4.1 Übertägige Standorterkundung – Ziele und wirtsgesteinsunabhängige Erkundungsmethoden	62
4.4.2 Übertägige Standorterkundung in unterschiedlichen Wirtsgesteinen	65
4.4.3 Untertägige Standorterkundung – Ziele und wirtsgesteinsunabhängige Erkundungsmethoden	71
4.4.4 Methoden der untertägigen Standorterkundung in unterschiedlichen Wirtsgesteinen	78

5	Technische Konzepte für HAW-Endlager	85
5.1	HAW-Endlager in Kristallingestein	85
5.1.1	Schweden	85
5.1.2	Finnland	90
5.2	HAW-Endlager in Tongestein	93
5.2.1	Belgien	93
5.2.2	Frankreich	97
5.2.3	Schweiz	103
5.3	HAW-Endlager in Salzgestein	107
5.4	Zusammenfassende Bewertung	114
6	Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss von HAW-Endlagern	115
6.1	Errichtung der übertägigen Anlagen	115
6.2	Errichtung der untertägigen Anlagen	116
6.2.1	Kristallingestein	116
6.2.2	Ton und Tonstein	121
6.2.3	Salzformationen	125
6.2.4	Technische Maßnahmen für den Endlagerbetrieb	127
6.3	Transport- und Einlagerungssysteme	128
6.4	Überwachungsmethoden beim Endlagerbetrieb (Monitoring)	136
6.4.1	Einleitung und Zielsetzung	136
6.4.2	Definition und Grundprinzipien einer Endlagerüberwachung	137
6.4.3	Parameter zur Endlagerüberwachung	139
6.4.4	Messkonzepte in den einzelnen Ländern	139
6.4.5	Messtechnik und Messmethoden in der Endlagerüberwachung	145
6.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	148
7	Genehmigungstechnische Aspekte	151
7.1	Finnland	151
7.2	Schweden	152
7.3	Frankreich	152
7.4	Belgien	153
7.5	Schweiz	153
7.6	Deutschland	154

8	Vergleichende Gegenüberstellung und Bewertung des international erreichten Standes bei der Realisierung von HAW-Endlagerprojekten	157
8.1	Standortauswahl und -untersuchung	157
8.2	Endlagerkonzeptentwicklung	158
8.3	Endlagererrichtung	159
8.4	Endlagerbetrieb und -überwachung	159
8.5	Verfüll- und Verschlusskonzepte	161
8.6	Zusammenfassende Bewertung	162
9	Tabellenverzeichnis	163
10	Abbildungsverzeichnis	165
11	Literaturverzeichnis	169
12	Liste der Anhänge	183

Zusammenfassung

Beim Betrieb von Leistungsreaktoren fallen ausgediente Brennelemente an, die entweder direkt oder nach deren Wiederaufarbeitung als hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfall einer Entsorgung zugeführt werden müssen. Dieser Herausforderung haben sich die meisten der Kernkraftwerke betreibenden Nationen gestellt sowie auch einige Länder, bei denen derartige Abfälle z. B. beim Betrieb von Forschungsreaktoren entstehen. Für die Endlagerung derartiger Abfälle werden – wie von der IAEA empfohlen – ausgehend von den Ergebnissen von Langzeitsicherheitsstudien und von Untersuchungen von natürlichen Analoga (z. B. Uranlagerstätten), aufgrund des erforderlichen langfristigen Isolationspotenzials weltweit tief lagernde geologische Formationen vorgesehen. Die jeweiligen Endlagerkonzepte richten sich neben technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich aus der Art und Menge der Abfälle und gesetzlichen Bestimmungen ergeben, vor allem nach den geologischen Voraussetzungen und den Barriereigenschaften der für das Endlagerbergwerk ausgewählten Wirtsgesteine.

Ziel des Forschungsvorhabens EUGENIA war es, gestützt auf eine detaillierte Beschreibung der endlagerrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Ton/Tongesteine und Kristallin, die Vorgehensweise bei der Standortsuche und -erkundung sowie den derzeitigen Stand der Endlagererrichtung (Endlagerkonzept, Endlagerbau und -betrieb, Verfüll- und Verschlusskonzepte sowie Endlagerüberwachungsmaßnahmen) am Beispiel der weit fortgeschrittenen Projekte zur Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle in Finnland, Schweden, Frankreich, Schweiz, Belgien, Deutschland und USA darzustellen. Der vorliegende Bericht fasst die bei dieser Recherche bis Ende 2009 erzielten Ergebnisse zusammen. In den 8 Anhängen zu diesem Bericht (s. beiliegende CD) sind detaillierte Informationen zu den einzelnen Themenschwerpunkten zusammengestellt.

Die Auswahl des Wirtsgesteins und von Standorten trägt im hohen Maße den nationalen territorialen, geologischen und sozialen Gegebenheiten Rechnung. Die Übertragung der für andere Länder entwickelten Konzepte und Vorgehensweisen auf Deutschland ist deshalb nur begrenzt möglich. Neben wirtsgesteinsunabhängigen geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (wie z. B. rezenter Vulkanismus und hohe seismische Aktivität) spielen aufgrund deutlicher Unterschiede in den endlagerrelevanten Eigenschaften gesteinspezifische Standortanforderungen bzw. Auswahlkriterien eine wichtige Rolle. So z. B. regelt die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine das Auswahlkriterium Mindestfläche. Die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz im Vergleich zum Ton/Tonstein ist dafür verantwortlich, dass Endlagerbergwerke im Steinsalz einen deutlich geringeren Platzbedarf haben als HAW-Endlager in Tonformationen.

Eine Analyse der weltweit praktizierten Vorgehensweisen und der bei der Standortsuche genutzten Entscheidungskriterien offenbart, dass die Auswahlprozedur häufig sehr pragmatisch und unter Zugrundelegung wirtschaftlicher und raumordnerischer Überlegungen durchgeführt wurde. So z. B. legten Länder wie Finnland, Schweden, Kanada oder Russland noch vor Beginn oder in einer sehr frühen Phase des Auswahlverfahrens fest, dass die Endlagerstandorte in unmittelbarer Nähe von bereits bestehenden kerntechnischen Anlagen zu errichten sind. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen beschränkte sich die

Aufgabe des Standortauswahlprozesses auf die Suche nach einem geeigneten, den Langzeitsicherheitsrichtlinien entsprechenden Standort in einem lokal begrenzten, vor Beginn des Auswahlprozesses vorgegebenen Raum. In vielen Fällen erfolgte die endgültige Standortfestlegung nicht auf der Grundlage eines „objektiven“, kriteriengestützten Vergleichs von alternativen, über das gesamte Landesterritorium verteilten Standorten, sondern wie z. B. in Frankreich oder in den USA durch politische Entscheidungen.

Es existiert kein international vereinbarter Standard für die Vorgehensweise bei der Standortsuche und die bei der Standortbewertung einzusetzenden Untersuchungsmethoden. Trotz aller länderspezifischen Unterschiede kann der Standortauswahlprozess in die Etappen Screening („overview studies“, „feasibility studies“, „area survey stage“, regionale Vergleichsstudien), Standortvorauswahl (d. h. Ausweisung von untersuchungswürdigen Standortregionen), übertägige Standorterkundung, untertägige Standorterkundung sowie endgültige Standortentscheidung untergliedert werden. Aufgrund spezifischer geologischer Gegebenheiten, unterschiedlich gewichteter Standortauswahlkriterien sowie verschiedenartiger rechtlicher, verwaltungstechnischer und politischer Vorgaben für den Auswahlprozess variieren Anzahl, Inhalt und Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte.

Die übertägigen Erkundungsarbeiten dienen vor allem zur Ermittlung von standortbezogenen Basisdaten, auf deren Grundlage die Erfüllung der Standortanforderungen (insbesondere Ausdehnung, Lage, Mächtigkeit und Teufe des Wirtsgesteins) nachgewiesen wird und die Durchführung einer ersten, noch vorläufigen standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse erfolgt. Außerdem liefert die übertägige geologische Erkundung einen Großteil der standortbezogenen Daten, die zur Weiterentwicklung des Endlagerkonzeptes sowie für die Planung und Durchführung der untertägigen Standorterkundung und des Endlagerbaus notwendig sind. Im Ergebnis der übertägigen Erkundungsarbeiten werden die Standortalternativen entsprechend ihrer Eignung gereiht.

Die unterschiedlichen physikalischen und mineralogisch-geochemischen Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen erfordern eine gesteinspezifische Vorgehensweise bei der über- und untertägigen Erkundung der Endlagerstandorte. Die übertägige Erkundung von Salzformationen ist vor allem auf die Analyse der äußeren Form und erste Informationen zum Internbau der Salzstruktur sowie der räumlichen Verbreitung und Tiefenlage der Salzgesteine, inklusive Tiefenposition und struktureologischer Bau des Sockels (Zerblockungsgrad, mächtige überregionale sowie lokale Störungszonen im Liegenden der Salzstruktur) ausgerichtet. Die übertägige Erkundung von Ton-/Tonsteinstandorten hat die Aufgabe, Gebiete auszuweisen, die eine ausreichende Mächtigkeit und Ausdehnung besitzen und in denen keine Störungszonen vorkommen sowie Gebiete aus dem weiteren Auswahlverfahren auszuschließen, die intensiv metamorph überprägt sind oder mächtige Störungszonen bzw. Bereiche mit intensiver Klüftung aufweisen. Die Suche nach geeigneten Endlagerstandorten im Kristallin konzentriert sich auf das Auffinden von wenig gestörten Gesteinsbereichen, weit entfernt von mächtigen, hydraulisch aktiven, tief reichenden Grundwassermigrationsbahnen. Im Vergleich zu Salinarformationen, für die auf der Grundlage nur weniger Erkundungsbohrungen ausgehend von salzgenetischen Modellvorstellungen relativ gut abgesicherte Prognosen zum Internbau, z. B. zu Vorkommen von möglicherweise lösungführenden Anhydriten und von Kalisalzen innerhalb der Salzstruktur möglich sind, ist für tonige und kristalline Gesteine eine

schlechte Prognostizierbarkeit des Aufbaus und der Eigenschaften charakteristisch. Insbesondere betrifft dies das Vorkommen, die Eigenschaften und die Vernetzung von grundwasserführenden Störungszonen und von Einschlüssen.

Die untertägige Standorterkundung hat das Ziel, alle Daten bereit zu stellen, die für die Durchführung der standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse (safety case) und die endgültige Standortentscheidung sowie für die Planung des Endlagerbergwerkes und die Optimierung des Endlagerkonzeptes erforderlich sind. Im Rahmen der untertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten erfolgen detaillierte stofflich-strukturelle Charakterisierungen des Endlagerwirtsgesteins sowie Analysen des struktureologischen Baus und der In-situ-Spannungsverhältnisse in den zur HAW-Einlagerung vorgesehenen Gesteinsbereichen. Parallel dazu werden umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen des Endlagerbaus und -betriebs auf das Isolationspotenzial der geologischen Barriere, wie z. B. des Verhaltens des Wirtsgesteins bei der Einlagerung von wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen, Untersuchungen der im Nahfeldbereich ablaufenden Prozesse (Wärmeabtransport, Spannungsauf- und -abbau, Druck- und temperaturabhängige Deformationen) sowie Analysen des Einflusses hydraulischer, geochemischer und physikalischer Parameter auf den Transport von Radionukliden durchgeführt. Im Mittelpunkt der untertägigen Erkundungsarbeiten stehen außerdem Demonstrationsversuche zur Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren und zur Interaktion zwischen der geologischen und den (geo)technischen Barrieren (z. B. Gasmigration, Radionuklidretardation), Weiterentwicklungen der technischen und geotechnischen Barrieren unter In-situ-Bedingungen, Untersuchungen zur Optimierung der Methoden der bergmännischen Auffahrungen bzw. der Bohr- und Sprengverfahren sowie In-situ-Tests der Einlagerungstechnik im Maßstab 1 : 1.

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

Die Entwicklung von Endlagerkonzepten bzw. die Errichtung derartiger Anlagen befinden sich in den einzelnen Ländern auf sehr unterschiedlichem Niveau. Gründe dafür sind neben den jeweiligen Finanzierungsmöglichkeiten für entsprechende Vorhaben sowie der zum Teil erst in den letzten Jahren entstandenen Notwendigkeit (osteuropäische Staaten) auch politische Entscheidungen zur Entsorgungsstrategie. Unterschiede bestehen vor allem zwischen Ländern, in denen die Kernenergie seit vielen Jahren etabliert ist (z. B. USA, Frankreich, Großbritannien), auch wenn ein Ausstieg festgelegt ist oder in Erwägung gezogen wird (z. B. Deutschland, Belgien, Schweden), und den Ländern, die nur einzelne KKW betreiben oder sich hinsichtlich der Kernkraft noch in der Entwicklung befinden. Der erreichte Entwicklungsstand für Endlager reicht von der Erarbeitung konzeptioneller Pläne über umfangreiche geologische, hydrogeologische, seismische u. ä. Erkundungen bis hin zu terminlichen Festlegungen, bis wann Untertagelabors und schließlich Endlager betriebsbereit sein sollen. Zum Teil sind bereits Endlagerstandorte ausgewählt und Arbeiten zur Errichtung angelaufen. In Deutschland wurde vor Beginn der ersten Endlagerplanungen Salz als Wirtsgestein favorisiert. Die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit, das Kriechverhalten und damit das Isolationspotenzial sowie die mehr als 150-jährigen Erfahrungen im Salzbergbau waren die

entscheidenden Gründe dafür. Forschung und Endlagerplanungen wurden seit Mitte der 60er Jahre dazu zielgerichtet durchgeführt. Mit der „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ liegen in Deutschland seit 1998 Planungen in Vorkonzepttiefe vor, die für Steinsalz in keinem weiteren Land auf vergleichbarer Detaillierungsstufe existieren. Darin sind auch die Ergebnisse der erfolgreich durchgeführten „Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente“ berücksichtigt. Das Konzept unterscheidet sich von denen in Kristallin und in Tonstein wesentlich hinsichtlich der vorrangigen Barrierenfunktion des Wirtsgesteins und damit auch deutlich hinsichtlich der Auslegung technischer und geotechnischer Barrieren. Für Steinsalz kann auf Grund seiner isolierenden Eigenschaften auch für Zeiträume, in denen die technischen und geotechnischen Barrieren nicht mehr wirksam sein müssen, ein Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden. Durch ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm wurde die technische Machbarkeit der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente sowohl durch systematische Arbeiten planerisch nachgewiesen als auch durch eine Reihe von Demonstrationsversuchen im Maßstab 1:1 erprobt.

In Deutschland liegen umfangreiche Bergbau-Erfahrungen für Salzformationen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau vor. Zudem liefert das Endlagerbergwerk Morsleben wichtige Erfahrungen über die Nutzung von Salzgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Zu den für den Bergbau positiven Eigenschaften des Salzes gehört seine hohe Standsicherheit, die einen Ausbau des Schachtes oder der Grubenräume in diesen Schichten meist überflüssig macht. Aufgrund des wasserführenden Deckgebirges erforderte das Schachteufen die Anwendung des Gefrierverfahrens. Am Standort Gorleben wurden die Schächte vom Deckgebirge bis ca. 90 m tief in die Salzformationen in verschiedenen Stufen mit Betonelementen und Stahlringen stabilisiert. Im Salinar ist der Schachtstoß mit Ankern und Maschendraht gegen Steinfall gesichert. Für das Auffahren des Endlagerbergwerks ist prinzipiell ein gebirgsschonendes Vortriebsverfahren mit Voll- oder Teilschnittmaschinen vorgesehen. Ein Ausbau der aufgefahrenen Hohlräume ist aufgrund der Standfestigkeit des Salzgesteins grundsätzlich nicht erforderlich. Da sich Salz langfristig jedoch plastisch verformt, werden die Hohlraumkonturen regelmäßig auf Veränderungen überprüft und ggf. mit Teilschnittmaschinen oder Firstenfräsen nachgeschnitten oder beraubt.

Bezüglich der Errichtung von Endlagerbergwerken für radioaktive Abfälle in Kristallingesteinen kann auf umfangreiche Erfahrungen zurückgegriffen werden, die weltweit im Bereich des Erzbergbaus sowie im Tunnelbau gesammelt wurden. Praktische Erfahrungen mit der Errichtung und dem Betrieb von Endlagerbergwerken für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Kristallingesteinen liegen aus Schweden (SFR), Norwegen (Himdalen) und Finnland (Loviisa, Olkiluoto) sowie aus den Unterlagelaboren Äspö (Schweden) und ONKALO (Finnland) vor. Auf der Grundlage dieser praktischen Erfahrungen wurden für generische Endlagerkonzepte Planungen für die Errichtung und den Betrieb erstellt. Aufgrund der hohen mechanischen Stabilität der Kristallingesteine ist bei Beachtung der Spannungsverteilungen ein stabilisierender Ausbau von Grubenräumen meist nicht erforderlich. Wasserführende Klüfte erfordern aber bereichsweise Maßnahmen zur Abdichtung. Die wesentlichen Techniken für das Schachtabteufen in kristallinen Wirtsgesteinen sind das Schachtbohrverfahren und das Bohr-/Sprengverfahren. Falls, z. B. im oberflächennahen Deckgebirge, lockere bzw. wasserführende Schichten oder Störungszonen durchteuft werden müssen, wird das Bohr-

/Sprengverfahren mit Gefrier- oder Injektionsverfahren kombiniert, um diese Gesteine abzudichten bzw. zu stabilisieren. Rampen wurden bisher, z. B. in den skandinavischen Projekten, meist im Bohr- und Sprengverfahren erstellt. Wie bei den Schächten ist eine detaillierte Vorerkundung erforderlich. Einlagerungsbohrlöcher müssen einen Sicherheitsabstand zu wasserführenden Störungen einhalten. Für ihre Erstellung wurden eine modifizierte Mikrotunnelbohranlage sowie eine Bohranlage mit Flachbohrkopf erprobt. Das Gerät und die Auffahrungsstrategien für die Auffahrung des Grubengebäudes entsprechen – abgesehen von den Einlagerungsbereichen – dem Stand der Technik im Bergbau. Die Untersuchungen in den Untertagelaboren liefern wichtige Grundlagen für die Planung der Auffahrung des Endlagerbergwerks.

Die bergbauliche Gewinnung von Tonen ist auf relativ geringe Tiefen beschränkt, doch ist Ton bzw. Tonstein ein wesentliches Nebengestein im Kohlebergbau und darüber hinaus im Deckgebirge vieler Bergwerke verbreitet, so dass insgesamt zahlreiche bergbauliche Erfahrungen mit Tonen und Tonsteinen vorliegen. Weitere Erfahrungen ergeben sich aus dem Tunnelbau. Weltweit wurden noch keine Endlager in Tonsteinen eingerichtet, doch sind diese Gesteine bevorzugte Wirtsgesteine in Belgien, Frankreich und der Schweiz und werden in diesen Ländern in Untertagelaboren (Hades, Meuse/Haute-Marne, Mont Terri) untersucht. Bei der Errichtung dieser Untertagelabore konnten wichtige bergbautechnische Erfahrungen bezüglich der Erstellung von Grubenräumen in potenziellen Wirtsgesteinen gesammelt werden. Die Schächte der beiden Untertagelabore Meuse/Haute Marne (Bure, Frankreich) und Hades (Belgien) wurden mit dem Bohr- und Sprengverfahren erstellt. Dabei musste in Bure zum Durchteufen wasserführender Deckgebirgsschichten das Gefrierverfahren eingesetzt werden. Für die Auffahrung von Grubenräumen im Tonstein ist in den meisten Endlagerprojekten der Einsatz von Teilschnittmaschinen vorgesehen. Alternativ ist auch gebirgschonendes Sprengen möglich. Die Auffahrungskonzepte orientieren sich an den gebirgsmechanischen Eigenschaften der Tone und Tonsteine. In plastischen Tonen sollen die Auffahrung und der Ausbau sehr rasch erfolgen. Die Stärke des Ausbaus richtet sich nach den Anforderungen an die jeweilige Strecke und ist z. B. in den Bereichen, die nach Abschluss des Betriebes als Standorte für Verschlussbauwerke vorgesehen sind, besonders hoch. Die Wahl des Bohrverfahrens für die Erstellung von Einlagerungsbohrlöchern in Tonen bzw. Tongesteinen richtet sich nach den gesteinsmechanischen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins. Tonsteine können meist mittels Rotary-Bohrverfahren komplett gekernt werden. Die Aufweitung der Bohrlöcher erfolgt in der Regel mit Schneckenbohrverfahren. Anschließend werden die Bohrungen durch eine Stahlverrohrung stabilisiert.

Die Konzepte für die Tagesanlagen der verschiedenen Endlagerkonzepte in Europa sind einander sehr ähnlich. Die Anlagen gliedern sich in kerntechnische Anlagen (Empfangshalle, Pufferhalle, Heiße Zelle für Umladen / Reparatur, Schacht / Rampe für Abfalltransport), den industriell-bergbaulichen Bereich (Werkstätten, Lagerhallen, ggf. Einrichtungen zur Herstellung von Verfüll-/Verschlussmaterial, Versorgung etc.), den Verwaltungsbereich und die Halde.

Für die technischen Systeme eines Endlagers kann z. T. auf bereits vorhandene Technik aus anderen Bereichen der kerntechnischen Entsorgung (Konditionierung, Zwischenlagerung, Transport) und des Bergbaus zurückgegriffen werden. Dies gilt z. B. für den übertägigen

Straßen- oder Schienentransport, Kransysteme für die Handhabung von Abfallgebinden, Schachtförderanlagen sowie untertägige Transporteinrichtungen. Diese Einrichtungen müssen ggf. den endlagerspezifischen Anforderungen, wie z. B. Abmessungen und Gewichte der Endlagergebinde mit oder ohne Transportabschirmung, sowie – die Bergbauanlagen – den kerntechnischen Sicherheitsanforderungen angepasst werden. Weitgehende Neuentwicklungen sind in der Regel für die Einlagerungssysteme erforderlich, da für sie sehr spezielle Anforderungen gemäß dem Einlagerungskonzept gelten, z. B. horizontale bzw. vertikale Bohrlochlagerung oder Streckenlagerung. Ihre Planung und die Entwicklung von Prototypen erfordern einen weit fortgeschrittenen und sehr detaillierten Stand bezüglich der Standortcharakterisierung und der Standort-, Endlager- und Endlagergebindeplanungen.

Ausgehend von Bergbausystemen basiert das deutsche Konzept für den untertägigen Transport von Abfallgebinden auf Schienenfahrzeugen, wobei endlagerspezifische Anpassungen im Hinblick auf die Transportgewichte, das begrenzte Platzangebot und die Kurvenradien erforderlich waren. Von den erforderlichen Plateauwagen wurden Prototypen gefertigt und erfolgreich erprobt. Weiterhin wurde eine Schachtförderanlage, die den Transport von bis zu 85 t Nutzlast ermöglicht, in einem Großversuch erfolgreich erprobt.

Daneben werden aufgrund der Handlichkeit und Flexibilität in einigen Konzepten anderer Länder auch Radsysteme favorisiert, deren Entwicklung sich aber noch im Konzeptstadium befindet.

Als platzsparende Transportvariante wird in den skandinavischen, französischen und belgischen Konzepten die Luft- bzw. Wasserkissentechnik vorgesehen. Diese Technik wird in der Industrie bereits verbreitet für die Handhabung und den Transport schwerer Lasten eingesetzt. Für die Anwendung im Endlager sind die geringe Bauhöhe und die hohe Beweglichkeit, die z. B. ein Drehen auf der Stelle ermöglicht und somit an Abzweigungen/Kreuzungen keine großen Kurvenradien erfordert, wichtige Vorteile. Das Konzept kann sowohl für den übertägigen Transport wie auch den untertägigen Transport durch die Verbindungsstrecken und in den horizontalen Einlagerungsbohrungen genutzt werden. Prototypen für diese Systeme wurden in Frankreich und Schweden erfolgreich getestet.

Für alle Wirtsgesteinstypen gibt es weit entwickelte und zum Teil bereits erprobte technische Systeme für die vertikale oder horizontale Bohrlochlagerung. Für das skandinavische KBS-3V-Konzept wurde ein System entwickelt, das Transport- und Einlagerungsfunktionen vereint. Von dieser Maschine wurde ein Prototyp gebaut und durch Versuche im Untertagelabor in Äspö erprobt. Eine modifizierte Variante wurde für das französische Konzept entwickelt. Die skandinavischen und französischen Einlagerungskonzepte sehen die horizontale Bohrlochlagerung vor. In enger Kooperation zwischen den Endlagergesellschaften wurden hierfür geeignete Transport- und Einlagerungssysteme entwickelt. Großbehälter („Supercontainer“) sollen mit einem Luft- oder Wasserkissensystem transportiert und von Robotern in die Einlagerungsbohrlöcher geschoben werden. Dieses System wurde in Demonstrationsversuchen erfolgreich getestet.

Das Konzept für die Bohrlochlagerung in Salz wurde in Deutschland in einem übertägigen Demonstrationsversuch erprobt. Dafür wurden alle erforderlichen Systeme und Komponenten-

ten, wie die Transportabschirmung, der Portalwagen, die Einlagerungsmaschine sowie die Bohrlochschleuse, entwickelt, gebaut sowie erfolgreich erprobt. Die Einlagerungsvorrichtung erfüllt alle kerntechnischen Anforderungen. Dieses Einlagerungssystem könnte prinzipiell auch in anderen Wirtsgesteinen, wie z. B. in Ton, eingesetzt werden. Die Streckenlagerung ist das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung von POLLUX-Behältern mit ausgedienten Brennelementen im Salz. Die technische Machbarkeit wurde durch einen Großversuch ebenfalls bereits nachgewiesen.

Alle Länder, die eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen verfolgen, sind sich einig über die Wichtigkeit der Endlagerüberwachung für die Beschreibung des Referenzzustandes, für das Fällen von Entscheidungen im stufenweisen Endlagerprogramm, die Sicherstellung der Betriebssicherheit, für 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.

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 bestehenden Endlagern für hoch radioaktive Abfälle vergleichsweise gering (WIPP), 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 und der Beständigkeit der Messsysteme in der Endlagerumgebung. Weiterhin ist es noch Gegenstand der Forschung, welche Parameter wie oft gemessen werden müssen. Dies ist direkt abhängig vom Wirtsgestein. Abgesehen vom WIPP-Überwachungsprogramm besteht keine Erfahrung bei der Festlegung der Messintervalle/-zeitpunkte und den entsprechenden Maßnahmen sowie bei Nichteinhaltung der Messwerte. Ein anerkanntes standardisiertes Vorgehen auf internationaler Ebene, z. B. auf EU-Ebene, wäre wünschenswert, um die Erwartungswerte zu untermauern. 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. Beispiels-

weise gibt es viele Forschungsprojekte zum Thema untertägige Kommunikation im Kohlebergbau in China.

In Belgien, Frankreich und der Schweiz wurden Endlagerkonzepte für tonige Wirtsgesteine entwickelt. Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept stellt im Tonstein das Wirtsgestein die entscheidende Barriere für den langzeitsicheren Einschluss des Radionuklidinventars dar. Einige wirtsgesteinsspezifische Anforderungen sind für alle Konzepte gleich, so z. B. die Integrität der Behälter während der thermischen Phase (einige 100 bis wenige 1000 Jahre je nach Inventar) und ein Temperaturgrenzwert von 100°C an der Behälteroberfläche. Aufgrund ähnlicher Fragestellungen und Probleme kooperieren ONDRAF/NIRAS, ANDRA und NAGRA bei der Durchführung von Forschungsprojekten zur Klärung grundlegender Aspekte der Wirtsgesteinscharakteristika und der Endlagertechnik.

Die begrenzte Mächtigkeit der Tonsteinformationen erfordert in vielen Fällen horizontal ausgerichtete Endlagerkonzepte. Die Verfüll- und Verschlusskonzepte sehen eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Puffermaterial, Streckenverschlüsse, Verfüllung der restlichen Grubenräume und Schachtverschlüsse vor. Bei allen Referenzkonzepten werden die Behälter in den Einlagerungsstrecken bzw. -bohrungen zum Schutz der Behälter und zur Rückhaltung freigesetzter Radionuklide von einem Puffermaterial, meist Bentonit, umschlossen. Im belgischen Supercontainer-Konzept ist ein Betonpuffer Teil des Behälters.

Aufgrund günstiger Materialeigenschaften ist Bentonit auch das bevorzugte Baumaterial für alle geotechnischen Barrieren. Diese Barrieren bilden eine hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall und verschließen potenzielle Wegsamkeiten bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz wieder vollständig verschlossen sind. Die Sicherheitsnachweiskonzepte orientieren sich alle am Stand von Wissenschaft und Technik, wie er z. B. in IAEA- und NEA-Berichten zusammengefasst wird. Als Grundlage für die Sicherheitsbewertung wurden in allen Fällen umfassende Forschungs- und Demonstrationsversuche durchgeführt, um die sicherheitstechnisch relevanten Prozesse im Endlager zu untersuchen und die technische Machbarkeit vorgesehener technischer Maßnahmen nachzuweisen. Die bei den Sicherheitsnachweisen zugrunde gelegten Normalentwicklungen basieren auf der Entwicklung in der Vergangenheit und beschreiben durch Analogie- und Plausibilitätsschlüsse eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung. Dabei wird die Integrität der Behälter sowie der geotechnischen Barrieren unterstellt. Behälterdefekt, der Ausfall von Barrieren, Human Intrusion sowie andere ungünstige Entwicklungen werden als Alternativszenarien betrachtet. Die Forschungsarbeiten für die Verfüll- und Verschlusskonzepte konzentrieren sich bei allen drei Endlagerorganisationen auf das Verfüllen und den Verschluss der Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöcher. Bei einer Verwendung eines Bentonitpuffers wird dieser entweder als hoch kompaktierte Bentonitblöcke oder als Bentonitpellets in die Einlagerungsstrecke eingebracht. Während für den Verschluss der Einlagerungsstrecken bereits recht detaillierte Planungen und Versuche vorliegen, sind für die Verfüllung und den Verschluss der anderen Grubenräume nur Grobkonzepte entwickelt worden. Strecken- und Schachtverschlüsse bestehen demnach aus Bentonitdichtelementen und Betonwiderlagern. Die restlichen Hohlräume werden mit Ton (Ausbruchmaterial) oder einem Ton/Sand-Gemisch verfüllt. Schwerpunkte der Forschungsarbeiten bildeten umfangreiche Materialuntersuchungen an verschiedenen Bentonit-Typen.

Weiterhin wurden die Herstellung von Bentonitpellets und -blöcken sowie Einbringtechniken untersucht und durch Großversuche erprobt. Weitere Materialuntersuchungen werden an Betonvarianten durchgeführt.

Kristallingesteine (Endlagerwirtsgestein in Schweden und Finnland) bieten eine hohe mechanische Standfestigkeit, die die Abfallgebinde während der Nachbetriebsphase schützt. Gleichzeitig sind die Gesteine aber häufig von wasserführenden Klüften durchzogen, so dass die Rückhaltefunktionen für die radioaktiven Inventare von technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten sind. Wesentliche Elemente des Sicherheitskonzeptes im Kristallingestein sind daher ein korrosionsresistenter Endlagerbehälter mit Standzeiten von wenigstens 100.000 Jahren sowie um den Endlagerbehälter ein Bentonitpuffer, um den Lösungszutritt zum Behälter zu vermeiden oder zu verzögern. Neben diesen beiden Maßnahmen sehen die Verfüll- und Verschlusskonzepte eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonit bzw. einem Bentonit/Gesteinsbruch-Gemisch sowie den Abschluss der Einlagerungsstrecken mit einem Verschlussbauwerk zu den Verbindungsstrecken hin vor. Für die Verfüllung des restlichen Grubengebäudes und der Schächte wurden bisher nur Grobkonzepte entwickelt. Im Prinzip sollen die für die Einlagerungsstrecken entwickelten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen auch hier eingesetzt werden. Für die Verfüllung und den Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher und -strecken wurde ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion entwickelt. Dieses Konzept basiert auf Sicherheitsfunktionen, Kriterien für die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen und Methoden für den Nachweis. Während SKB bereits einen ersten Langzeitsicherheitsnachweis für Forsmark entsprechend dem internationalen Stand erstellt hat, hat POSIVA gerade erst mit der Erstellung eines derartigen Nachweises für ONKALO begonnen. Als Normalentwicklung wird unterstellt, dass alle Behälter und geotechnischen Barrieren entsprechend ihrer Auslegung funktionieren. Behälter- und Barrierendefekte werden als Alternativszenarien betrachtet. Entsprechend ihrer Bedeutung für das Sicherheitskonzept bilden die Behälter und das Verfüllmaterial die Schwerpunkte für die Forschungsprogramme. Es wurde eine Reihe von Bentonittypen auf ihre Stabilität in den jeweils standortspezifischen hydrochemischen Milieus untersucht. Außerdem werden die Herstellung von Bentonitformelementen sowie der Transport und die Einbringung dieser Elemente in In-situ-Versuchen erprobt. Zement, der für Widerlager von Barrieren, zur Abdichtung von Störungen und Rissen durch Injektionen sowie als Puffer beim Supercontainerkonzept benötigt wird, soll einen möglichst niedrigen pH-Wert haben. Die entsprechenden Untersuchungen laufen noch.

Das Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager in Salz in Deutschland wurde entsprechend dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik überarbeitet. Es wurde ein deterministisches Nachweiskonzept für die Integrität der geotechnischen Barrieren entwickelt. Hierdurch wird der Kompatibilitätsnachweis mit den Anforderungen des Langzeitsicherheitsnachweises geführt. Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschusses der Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere. Dabei wird zwischen wahrscheinlichen und wenig wahrscheinlichen Entwicklungen unterschieden. Das entsprechende Schließungskonzept für das Referenzendlagerkonzept in Salz sieht die vollständige Verfüllung des Grubengebäudes mit Salzgrus vor. Außerdem sollen die Einlagerungsbohrlö-

cher, die Verbindungsstrecken zwischen den Schächten und den Einlagerungsbereichen und die Schächte durch Verschlussbauwerke abgedichtet werden.

Die bisherigen Untersuchungen zu Verfüllmaterialien und -maßnahmen konzentrieren sich auf die petrophysikalischen Eigenschaften von Salzgrus bei der Streckenverfüllung unter dem Einfluss der wärmeentwickelnden Abfälle und der Gebirgskonvergenz. Diese Untersuchungen werden noch fortgeführt. Für die Verschlussbauwerke in Einlagerungsbohrlöchern, Verbindungsstrecken und Schächten wurden grundlegende Untersuchungen begonnen, aber noch keine Referenzkonzepte festgelegt. Als Strecken- und Schachtverschlüsse werden Mehrkomponentenbauwerke mit Widerlagern und Dichtelementen vorgesehen. Das Design und die Auswahl der Baumaterialien sind noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung, so dass auch noch keine abdeckenden Funktionalitätsnachweise erstellt werden konnten.

Es kann festgestellt werden, dass der Kenntnisstand bei der Behälterentwicklung sowie bei den Einlagerungskonzepten einschließlich dem Verschluss der Einlagerungsstrecken/-bohrlöcher für alle Wirtsgesteine weit fortgeschritten ist. Schwerpunkte der Forschung waren dabei die petrophysikalischen Eigenschaften des Verfüllmaterials und die Wechselwirkungen mit dem Endlagergebände. Ein besonders umfangreicher Kenntnisstand liegt über die verschiedenen Bentonit-Typen vor, die als Baumaterial für Dichtelemente in allen Wirtsgesteinen vorgesehen sind. Die entsprechende Einbringtechnik wird z. Z. in Großversuchen erprobt. Zu den Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Teilen des Grubengebäudes liegen bisher für alle Wirtsgesteine nur Grobkonzepte vor. Entsprechende Erweiterungen der Forschungsprogramme werden in der Zukunft durchzuführen sein.

Die genehmigungsrechtlichen Grundlagen und zuständigen Organisationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Finnland, Schweden, Frankreich, Belgien, in der Schweiz, in den USA und in Deutschland wurden dargestellt. Das entsprechende gesetzliche Regelwerk legt die Grundlagen und die Rahmenbedingungen für die Planung und Umsetzung von Endlagern fest. Darin sind auch Ziele und Anforderungen aus sicherheitstechnischer und umweltpolitischer Sicht enthalten. Bezüglich der Sicherheitsprinzipien und -standards sowie der Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Stoffe im Untergrund besteht – entsprechend den Festlegungen in internationalen Fachorganisationen, wie der OECD-NEA, der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) und der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) – weitgehender internationaler Konsens. Hinzu kommen für die Mitgliedsländer der Europäischen Gemeinschaft die Vereinbarungen gemäß dem EURATOM-Vertrag bzw. die EG-Richtlinien. Wichtige Aspekte des internationalen Regelwerks sind die kerntechnische Sicherheit, der Strahlenschutz, die Entsorgung radioaktiver Abfälle und die Haftung Dritter im Bereich der Kerntechnik. In den betrachteten Ländern wurden die entsprechenden internationalen Verpflichtungen bereits in das nationale Regelwerk übernommen oder die entsprechende Umsetzung befindet sich in der Vorbereitung. Insgesamt besteht somit bei den betrachteten Ländern ein weitgehend einheitliches Niveau in diesen sicherheitstechnischen Bereichen.

Die wesentlichen Elemente des kerntechnischen Regelwerks sind in den meisten Ländern: ein Kernenergiegesetz, ein Strahlenschutzgesetz und ein Haftungsgesetz. Weiterhin ist in allen Ländern bei der Genehmigung kerntechnischer Anlagen die Umweltgesetzgebung zu

berücksichtigen (Umweltverträglichkeitsprüfung). Ein Erfordernis für bergrechtliche Genehmigungen für ein Endlager besteht nur in Deutschland. Die Ausgestaltung der Genehmigungsverfahren für HAW-Endlager variiert entsprechend der jeweiligen nationalen Gesetzgebung, der Behördenstrukturen und politisch-sozialer Strategien. In allen betrachteten Ländern werden Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente im kerntechnischen Regelwerk hinsichtlich der gesetzlichen Anforderungen und des Genehmigungsverfahrens wie andere kerntechnische Anlagen behandelt. Eine Öffentlichkeitsbeteiligung ist, neben der Umweltverträglichkeitsprüfung, immer ein wesentlicher Aspekt. Endlagerspezifische Aspekte, wie die Standortwahl, bergbauliche Aspekte, der Langzeitsicherheitsnachweis etc., sind im untergeordneten Regelwerk festgelegt. Während die Genehmigungsverfahren für Endlager in den meisten Ländern mehrphasig sind (Standortfestlegung – Bau – Betrieb – Stilllegung), ist das deutsche Genehmigungsverfahren für Endlager einphasig (Panfeststellungsverfahren).

1 Zielsetzung der Untersuchungen

Seit Beginn von Endlagerplanungen besteht weltweit Konsens darin, dass hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente durch die Einlagerung im tiefen geologischen Untergrund langfristig und sicher vom Lebensraum des Menschen und seiner Umwelt isoliert werden können. Konzepte und Planungen für die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente) gibt es weltweit für unterschiedliche Wirtsgesteine in verschiedenen Entwicklungsstadien. Länder wie Finnland und Schweden verfolgen Endlagerprojekte im Granit und haben bereits Standorte ausgewählt und mit detaillierten untertägigen Erkundungsmaßnahmen begonnen. Demgegenüber haben Frankreich oder die Schweiz, die Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Tonformationen planen, Konzepte entwickelt, aber noch keinen Standort verbindlich festgelegt.

In Deutschland wurde bereits in den 1960er Jahren die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Salzformationen im tiefen geologischen Untergrund favorisiert und Mitte der 1970er eine Standortauswahl und -entscheidung für ein Erkundungsbergwerk im Salzstock Gorleben getroffen. Parallel zur Erkundung des Standortes wurden Planungen für ein Endlager für alle Arten von radioaktiven Abfällen in Steinsalzformationen begonnen. Zunächst wurden Konzepte ohne standortspezifische Randbedingungen in generischer Art und Weise entwickelt. Anschließend wurde im Rahmen eines umfassenden, Mitte der 1980er Jahre gestarteten Forschungs- und Entwicklungsprogramms die technische Machbarkeit der „Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente“ untersucht. Dies beinhaltete sowohl die Entwicklung einer standortspezifischen Endlagerkonzeption als auch Demonstrationsversuche. Wesentliche Komponenten der Transport- und Einlagerungstechnik für selbstabschirmende POLLUX-Behälter wurden in diesem Zusammenhang entwickelt, gefertigt, erprobt und zur technischen Reife geführt. Dies erfolgte mit der Zielstellung, parallel zur Erkundung des Standortes auch die notwendigen Einrichtungen und Geräte, die für einen sicheren Endlagerbetrieb erforderlich sind, erprobt zu Beginn eines Genehmigungsverfahrens bereit stellen zu können. Mit der sogenannten „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ [Filbert & Engelmann 1998] wurden schließlich 1998 zum ersten Mal Planungen, die alle technischen Aspekte eines künftigen Endlagers in Salzformationen berühren, erarbeitet. Dabei wurden zum einen die Ergebnisse des vorgenannten Forschungs- und Entwicklungsprogramms und zum anderen die inzwischen aus der untertägigen Erkundung vorhandenen Erkenntnisse zur geologischen Struktur des Salzstockes Gorleben berücksichtigt.

Mit der Ende der 1990er Jahre getroffenen Entscheidung der Bundesregierung, zunächst Untersuchungen zur Endlagerung in alternativen Wirtsgesteinen intensiver durchzuführen, bevor über weitere Schritte zur Eignungsuntersuchung des Standortes Gorleben befunden wird, wurden FuE-Arbeiten zur Endlagerung in Salzformationen deutlich verringert.

Die vorliegende, in Kooperation von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und DBE TECHNOLOGY GmbH erstellte EUGENIA-Studie hatte zum Ziel, den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik zur Planung, zur Errichtung und zum Betrieb von Endlagern für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, insbesondere in den geo-

logischen Formationen Salz, Tonstein und Magmatit zu recherchieren und unter Berücksichtigung der dazu durchgeführten FuE-Arbeiten in einem Kompendium zusammenzustellen. Dabei sollten die in Deutschland über mehrere Jahrzehnte gezielt entwickelten Konzepte und technischen Komponenten für ein Endlager in Salz inklusive der dabei weltweit einmaligen FuE-Ergebnisse besonders herausgestellt werden. Darüber hinaus sollten die im europäischen Ausland entwickelten Endlagerkonzepte für Wirtsgesteine wie Granit und Tonstein kurz beschrieben und hinsichtlich einer möglichen Übertragung auf deutsche Standortregionen bewertet werden.

Die Studie konzentriert sich auf die in Deutschland seit Mitte der 1960er Jahre durchgeführten Arbeiten zur Planung und Errichtung eines HAW-Endlagers in Salz. Dies umfasst sowohl die Standortsuche und -erkundung als auch alle Planungen und technischen Entwicklungen im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten zum Endlagerkonzept bzw. zur Transport-, Einlagerungs- und Überwachungstechnik. Weiterhin wird der international erreichte Stand der Planung und Realisierung von Endlagerbergwerken sowie die dazu erforderliche Technik für Endlagerprojekte in den Wirtsgesteinen Tonstein, Magmatit, Tuff und Salz zusammenfassend dargestellt.

Der vorliegende Bericht beginnt in Kapitel 2 mit einem ersten Überblick über international entwickelte Endlagerungskonzepte für hochradioaktive Abfälle in tiefen Gesteinsformationen. Die endlagerrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und kristalline Gesteine sind in Kapitel 3 beschrieben. Die Standortauswahl und Standorterkundung für ein solches Endlager wird anschließend in Kapitel 4 für die ausgewählten Länder Deutschland, Frankreich, Schweiz, Schweden, Finnland und USA zusammengefasst. Technische Konzepte für HAW-Endlager in Salz, Tonstein und kristallinem Gestein sind in Kapitel 5 dargestellt. In Kapitel 6 werden dann die technischen Maßnahmen zum Bau, Betrieb und zum Verschluss von Endlagern an Beispielen erläutert. Dies schließt auch das Thema Endlagermonitoring ein. Ein kurzgefasster Vergleich in Kapitel 7 beleuchtet die genehmigungsrechtlichen Aspekte bei der Endlagerung in den vorgenannten Ländern. Das abschließende Kapitel 8 ist der vergleichenden Gegenüberstellung und Bewertung des international erreichten Standes bis Ende 2009 bei der Realisierung von HAW-Endlagerprojekten gewidmet.

In den folgenden Kapiteln werden die erzielten Arbeitsergebnisse des Vorhabens zusammengefasst. Weitere Informationen und detailliertere Beschreibungen sind in den Arbeitspaketberichten enthalten, die diesem Abschlussbericht als Anhänge 1-8 beigelegt wurden.

2 Überblick über international entwickelte Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Gesteinsformationen sowie über Unterschiede der zugrundegelegten Sicherheitskonzepte

Beim Betrieb von Leistungsreaktoren fallen ausgediente Brennelemente an, die entweder direkt oder nach deren Wiederaufarbeitung als hochradioaktiver verglaster Abfall einer Endlagerung zugeführt werden müssen. Dieser Problematik haben sich die meisten Länder, die Kernkraftwerke (KKWs) betreiben, gestellt sowie auch einige Länder, bei denen derartige Abfälle z. B. beim Betrieb von Forschungsreaktoren anfallen. In Tabelle 2-1 sind die weltweit zum 31.12.2009 in Betrieb befindlichen Kernkraftreaktorblöcke nach Ländern sortiert aufgelistet. Insgesamt waren zu diesem Zeitpunkt in 30 Ländern 437 Kernkraftreaktorblöcke in Betrieb. Von der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) empfohlen und auch international favorisiert ist für die Entsorgung dieser Abfälle die Einrichtung von Endlagern in tiefen geologischen Formationen, insbesondere im Salz, in Ton- und Kristallingesteinen (hauptsächlich granitischer Zusammensetzung).

Tabelle 2-1: KKW-betreibende und sonstige mit der Endlagerung befasste Länder [Kernenergie 2010]

KKW-betreibende Länder mit Anzahl von Leistungsreaktoren (Stand 2009)				Sonstige Länder	
Argentinien	2	KKW-Blöcke	Niederlande	1 KKW-Block	Australien
Armenien	1	KKW-Block	Pakistan	2 KKW-Blöcke	Indonesien
Belgien	7	KKW-Blöcke	Rumänien	2 KKW-Blöcke	Italien
Bulgarien	2	KKW-Blöcke	Russland	31 KKW-Blöcke	Lettland
Brasilien	2	KKW-Blöcke	Schweden	10 KKW-Blöcke	Norwegen
China	11	KKW-Blöcke	Schweiz	5 KKW-Blöcke	Polen
Deutschland	17	KKW-Blöcke	Slowakei	4 KKW-Blöcke	
Finnland	4	KKW-Blöcke	Slowenien	1 KKW-Block	
Frankreich	59	KKW-Blöcke	Spanien	8 KKW-Blöcke	
Großbritannien	19	KKW-Blöcke	Südafrika	2 KKW-Blöcke	
Indien	18	KKW-Blöcke	Taiwan	6 KKW-Blöcke	
Japan	54	KKW-Blöcke	Tschechei	6 KKW-Blöcke	
Kanada	18	KKW-Blöcke	Ukraine	15 KKW-Blöcke	
Südkorea	20	KKW-Blöcke	Ungarn	4 KKW-Blöcke	
Mexiko	2	KKW-Blöcke	USA	104 KKW-Blöcke	

Die Entwicklung von Endlagerkonzepten und Errichtung von Endlagern für derartige radioaktive Abfälle befindet sich in den einzelnen Ländern in sehr unterschiedlichen Stadien. Gründe dafür sind neben der Finanzierung solch umfangreicher und zeitaufwendiger Vorhaben die zum Teil fehlenden politischen Entscheidungen zur nationalen Entsorgungsstrategie. Darüber hinaus ist in einigen osteuropäischen Ländern die Notwendigkeit, die Entsorgungsfrage zu lösen, erst in den letzten Jahren entstanden. Vorher gab es Vereinbarungen zur Rücknahme ausgedienter Brennelemente mit den brennstoffliefernden Nationen (ehemalige Sowjetunion). Unterschiede bestehen vor allem zwischen Ländern, in denen die Kernenergie seit mehreren Jahrzehnten etabliert ist (z. B. USA, Frankreich, Großbritannien und Deutsch-

land) – auch wenn ein Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung festgelegt ist wie in Deutschland oder Belgien – und den Ländern, die nur einzelne KKW's betreiben oder sich hinsichtlich der Kernkraftnutzung noch in der Entwicklung befinden. Die meisten Länder sind bestrebt, eine nationale Lösung zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente zu finden. Auf Grund der geforderten langfristigen Isolation dieser Abfälle von der Biosphäre sind die Lösungen auf die Einrichtung von Endlagern in tiefen geologischen Formationen gerichtet. Die Aktivitäten dafür reichen von Ideen und Entwürfen zu Standortvorauswahlverfahren über Errichtung und Betrieb von Untertagelaboren mit umfangreichen geologisch-geophysikalischen, hydrogeologischen u. ä. Erkundungen bis hin zu terminlichen Festlegungen, bis wann Endlager gebaut und betriebsbereit (z. B. Finnland, im Jahr 2020) sein sollen. Länder, die sich bisher noch nicht auf eine nationale Strategie festgelegt haben (z. B. Spanien, Litauen, Ungarn), fassen neben einer zentralen langzeitlichen Zwischenlagerung der ausgedienten Brennelemente auch die eventuelle Beteiligung an einem internationalen Endlager ins Auge und beteiligen sich an entsprechenden Überlegungen und Studien.

Relativ weit vorangeschritten sind die Vorbereitungen zur Realisierung von HAW-Endlagern vor allem in Schweden, in Finnland, in Belgien, in Frankreich, in der Schweiz, in den USA und in Deutschland. Die in diesen Ländern entwickelten Endlagerkonzepte und die zugrunde gelegten Sicherheitskonzepte werden im Folgenden kurz vorgestellt. Weitere Informationen dazu sind im Anhang 1 zu diesem Synthesebericht zusammengestellt.

Hinsichtlich der Einrichtung von Endlagern in tiefen geologischen Formationen nehmen die USA einen besonderen Status ein. Ein Endlager in Steinsalz (WIPP – Waste Isolation Pilot Plant, nahe Carlsbad, New Mexico) wurde bereits 1999 in Betrieb genommen. Es steht für insgesamt rund 180.000 m³ nicht wärmeentwickelnde Transuran-Abfälle („TRU-Waste“) aus dem militärischen Bereich zur Verfügung. Das Endlager liegt in 657 m Tiefe in einer ungestörten, geschichteten, insgesamt 600 m mächtigen Steinsalzformation des Perms. In 8 Endlagerfeldern werden die Endlagerbehälter entweder in Kammern gestapelt oder in horizontalen Bohrlöchern gelagert. Bis Ende 2007 waren insgesamt rund 52.000 m³ radioaktiver Abfall eingelagert worden. Für die Endlagerung von wärmeentwickelnden HAW und ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren war der Standort Yucca Mountain im Bundesstaat Nevada (Tuffgestein, ca. 10 km langer Bergrücken in Wüstenklima) ausgewählt worden. Die im November 2008 neu gewählte US-Regierung hat entschieden, die weiteren Arbeiten zur Vorbereitung und Errichtung des Endlagers zu stoppen und ein Alternativkonzept zu entwickeln. Das Endlagerkonzept sah die rückholbare Einlagerung von Endlagerbehältern in den horizontalen Strecken eines Bergwerkes etwa 200 bis 425 m unter Geländeoberfläche vor. Der Genehmigungsantrag wurde 2008 bei der zuständigen Genehmigungsbehörde NRC (Nuclear Regulatory Commission) eingereicht und von dieser angenommen. Die Inbetriebnahme des Endlagers war für das Jahr 2020 geplant. Dieses Endlagerkonzept wird im vorliegenden Bericht nicht weiter berücksichtigt, da Tuffe als Wirtsgestein in Deutschland nicht zur Verfügung stehen.

In einigen Ländern sind Kristallingesteine (meist Magmatite) die bevorzugte Wirtsgesteinsformation. Schweden und Finnland sind mit der Implementierung eines HAW-Endlagers in Granit sehr weit vorangeschritten, wobei das finnische Konzept weitgehend dem schwedi-

schen Konzept entspricht. Schweden will 2010 und Finnland 2012 die Genehmigungsunterlagen für die festgelegten Standorte Forsmark (Schweden) und Olkiluoto (Finnland) einreichen. Der Endlagerbetrieb soll in beiden Ländern etwa 2020 starten. Das Referenzkonzept, das in beiden Ländern fast identisch ist, beinhaltet die Einlagerung von Endlagerbehältern mit ausgedienten Brennelementen in vertikale Bohrlöcher in einem Bergwerk in ca. 500 m Teufe. Eine Wiederaufarbeitung der ausgedienten Brennelemente ist grundsätzlich nicht vorgesehen. Das Sicherheitskonzept basiert auf einem Multibarrierenkonzept, bei dem den technischen und geotechnischen Barrieren ein hoher Stellenwert zugeordnet wird. Das Wirtsgestein ist in beiden Ländern an den ausgewählten Standorten aufgrund seines Spröbruchverhaltens durch ein weit verbreitetes, bei der Standortauswahl nicht vollständig ausschließbares Vorkommen von Klüften und Störungszonen gekennzeichnet. Damit kann der geologischen Barriere außer ihrer mechanischen Stabilität auf Dauer keine hohe Schutzfunktion zuerkannt werden und es ist mit Wasserzutritt in die Einlagerungsbereiche zu rechnen. Um dennoch die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre wirksam zu verhindern, sind die Endlagerbehälter und Puffermaterialien als technische sowie Verfüllungen und Verschlüsse als geotechnische Barrieren entsprechend ausgelegt. Ein besonderer Schwerpunkt des Referenzkonzeptes, dem sogenannten KBS-3-Konzept, liegt deshalb auf der Auslegung der Endlagerbehälter, für die eine korrosionsbeständige Kupferumhüllung vorgesehen ist. Der Ringraum sowie der Boden und der Abschluss des Bohrloches werden mit kompaktiertem Bentonit verfüllt. Eine Übertragung dieses Konzeptes auf Bedingungen in Deutschland ist prinzipiell denkbar. Da Magmatitformationen mit hinreichenden Endlagereigenschaften (z. B. Größe der weitgehend ungestörten Gesteinsblöcke) nach Aussage der BGR [Bräuer et al. 2004] in Deutschland nicht vorkommen, wird ein solches Endlagerkonzept nicht weiter verfolgt.

In einigen Ländern, wie z. B. in Belgien, Frankreich und der Schweiz, wird Tongestein als Wirtsgestein für ein HAW-Endlager untersucht. Da auch in Tongesteinsformationen der Zutritt von Grundwasser in die Einlagerungsbereiche nicht auf Dauer ausgeschlossen werden kann, sind in den entsprechenden Endlagerkonzepten neben der geologischen Barriere die technischen und geotechnischen Barrieren ebenfalls von großer Bedeutung. In Belgien wird der sogenannte Boom-Clay als Wirtsgestein für ein HAW-Endlager untersucht. Dieser plastische Ton erfordert einen massiven Ausbau aller Endlagerhohlräume des Endlagerbergwerkes. Das Referenzkonzept sieht dementsprechend vor, dass in mit Betontübbingen ausgebauten horizontalen Stecken des Endlagerbergwerkes in etwa 300 m Tiefe die ausgedienten Brennelemente oder HAW-Kokillen in sogenannten Supercontainern eingelagert werden. Die Supercontainer bestehen aus zylindrischen dickwandigen Betonbehältern, in dessen Innerem sich jeweils 2 HAW-Kokillen oder 4 ausgediente Brennelemente in einem dicht verschweißten Stahlbehälter befinden. Der verbleibende Hohlraum zwischen Supercontainer und Einlagerungsstrecke wird mit Beton verfüllt. Der Supercontainer und die Betonverfüllung stellen die technischen Barrieren im Multibarrierenkonzept dar. In den Konzepten in Frankreich und der Schweiz soll die Isolation der Abfälle vor potentiell eindringendem Wasser hauptsächlich durch Puffer- und Verfüllmaterialien aus Ton – insbesondere aus quellfähigem Tonmaterial (Bentonit) – erreicht werden. Dazu ist die Verwendung von vorkompaktierten Bentonitblöcken und -pellets vorgesehen. Die Technologie zur Herstellung, zur Handhabung und insbesondere zum Einbau dieser Bentonitbausteine ist noch in der Entwicklungs- bzw. Erprobungsphase. Das französische Endlagerkonzept sieht

die Einlagerung von Endlagerbehältern mit HAW-Kokillen in verrohrten horizontalen Bohrlöchern in Tonstein vor. Bentonit wird für den endgültigen Verschluss der Bohrlöcher und Strecken vorgesehen. Das schweizerische Endlagerkonzept sieht die Einlagerung von Endlagerbehältern für HAW und ausgediente Brennelemente in horizontalen Strecken vor. Die Endlagerbehälter werden dabei auf kompaktierten Bentonitblöcken abgelegt und der verbleibende Hohlraum mit Bentonitgranulat verfüllt. Eine Übertragung dieser Konzepte auf deutsche Verhältnisse wäre prinzipiell möglich, da nach Feststellung der BGR [Hoth et al. 2007] prinzipiell geeignete Tonformationen in Norddeutschland und in begrenztem Umfang auch in Süddeutschland vorhanden sind. Konkrete Bewertungen der Eignung dieser Tonformationen stehen aufgrund des Fehlens detaillierter Standorterkundungsarbeiten aus.

In einigen Ländern, wie z. B. USA, Deutschland, Niederlande und Polen wird Salz als Wirtsgestein für ein Endlager betrachtet. In den USA ist ein Endlager im Steinsalz seit 1999 in Betrieb (WIPP, Carlsbad/New Mexico). Dort werden ausschließlich radioaktive Transuran-Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung eingelagert. Das für diesen Standort entwickelte Endlagerkonzept ist damit auf hochradioaktive und wärmeentwickelnde Abfälle nur zum Teil übertragbar. In den Niederlanden ist ein Konzept für ein Endlager im Steinsalz entwickelt worden, mit dem die sichere Einlagerung hochradioaktiver Abfälle nachgewiesen werden konnte. Auf Grund von zu geringer Akzeptanz ist in den Niederlanden jedoch die politische Entscheidung getroffen worden, alle Arten von radioaktiven Abfällen über mindestens 100 Jahre in den Niederlanden zwischenzulagern. Weitere Untersuchungen bezüglich der Endlagerung sind damit auf unbestimmte Zeit ausgesetzt.

In Deutschland wurde von Beginn der ersten Endlagerplanungen Salz als Wirtsgestein favorisiert. Aufgrund von mehr als 150-jährigen Erfahrungen im Salzbergbau sind die Voraussetzungen für die Herstellung und den sicheren Betrieb von Salzbergwerken gegeben. Ein weiterer entscheidender Grund für die Auswahl von Salz als Wirtsgestein ist die im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen relativ hohe Wärmeleitfähigkeit sowie das Verformungsverhalten (Kriechverhalten). Damit hat die geologische Barriere Salz ein sehr hohes Isolationspotential. Forschung und Entwicklung sowie Endlagerplanungen wurden seit den 1960er Jahren im Hinblick auf die Realisierung eines HAW-Endlagers in Salz durchgeführt. Mit der „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ liegen in Deutschland seit 1998 Planungen in Vorkonzepttiefe vor, die für Steinsalz in keinem weiteren Land auf vergleichbarer Detaillierungsstufe erarbeitet wurden. Das Konzept unterscheidet sich von denen in Kristallin- und in Tongestein wesentlich hinsichtlich der Barrierenfunktion des Wirtsgesteins und damit auch stark hinsichtlich der Auslegung technischer und geotechnischer Barrieren. Für Steinsalz kann auf Grund seiner isolierenden Eigenschaften für Zeiträume, in denen die technischen und geotechnischen Barrieren nicht mehr wirksam sein müssen, ein Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden. Durch ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm wurde die technische Machbarkeit der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente sowohl durch systemanalytische Arbeiten planerisch nachgewiesen als auch durch eine Reihe von Demonstrationsversuchen im Maßstab 1:1 erprobt. Weitere Einzelheiten zu den international verfolgten Konzepten zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen Gesteinsformationen sind in den Kapiteln 5 und 6 ausführlicher beschrieben.

In den beiden folgenden Kapiteln werden zunächst die Wirtsgesteinseigenschaften von Salz, Ton und Kristallingestein im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Standortsuche und das Endlagerkonzept beschrieben. Die jeweiligen Verfahren zur Standortauswahl und -erkundung werden anschließend erörtert.

3 Wirtsgesteinseigenschaften und ihr Einfluss auf die Standortsuche/-erkundung und die Endlagerkonzepte

Die genaue Kenntnis der endlagerrelevanten Eigenschaften der für die langfristige Isolation von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen prinzipiell geeigneten Gesteinstypen Stein-salz, Tongesteine und kristalline Gesteine ist sowohl für die Standortsuche und -erkundung als auch für die Entwicklung der Endlagerkonzepte notwendig. Neben den Standortanforderungen (siehe Kap. 4.1) bestimmen die Wirtsgesteinseigenschaften die Vorgehensweise sowie die Untersuchungsmethoden bei der Standortsuche bzw. -charakterisierung. Außerdem erfolgt auf der Grundlage der im Rahmen der Standorterkundung detailliert erfassten Gesteinseigenschaften im standortbezogenen Langzeitsicherheitsnachweis eine genaue Bewertung der Barrierewirkung des geologischen Umfeldes des Endlagers. Die Gesteinseigenschaften beeinflussen entscheidend die Auslegung der technischen bzw. geotechnischen Barrieren. Die für die Langzeitsicherheit von HAW-Endlagern relevanten Wirtsgesteinseigenschaften (z. B. Transport-/Barriereigenschaften für Radionuklide) müssen im Verlaufe der Standorterkundung besonders detailliert untersucht und ggf. im Einlagerungs- und Verschlusskonzept hinsichtlich ihrer langzeitlichen Auswirkungen berücksichtigt werden.

3.1 Einfluss der Wirtsgesteinseigenschaften auf die Standortsuche/-erkundung

Günstigstenfalls müsste ein Wirtsgestein, in dem hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle endgelagert werden sollen, gleichzeitig über die in Tabelle 3-1 erfassten Eigenschaften verfügen.

Tabelle 3-1: Geologische und geotechnische Anforderungen an ein Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle

geringe Wasserführung
sehr geringe Wasser- und Gasdurchlässigkeit
hohe Wärmeleitfähigkeit
niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient
hohe Stabilität gegenüber geodynamischen Einwirkungen (z. B. Erdbeben, neotektonische Prozesse)
hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide
leichte bergmännische Erschließbarkeit
Standortsicherheit bergmännischer Auffahrungen über lange Zeiträume

Da es keinen Gesteinstyp gibt, der alle genannten Kriterien erfüllt, ist die Entscheidung für ein bestimmtes Wirtsgestein ein schwieriger Abwägungsprozess, der durch die nationalen geologischen Voraussetzungen sowie durch politische Vorgaben und raumordnerische Gesichtspunkte bestimmt wird.

3.1.1 Steinsalz

Aufgrund über 150-jähriger Erfahrungen im industriellen Salzbergbau und jahrzehntelanger Endlagerforschung sowie umfassenden Kenntnissen zur langzeitsicheren Lagerung chemisch-toxischer Abfälle im Steinsalz, liegt ein umfangreiches Wissen zu den endlagerrelevanten Eigenschaften von Steinsalz sowie zum geologischen Bau von Salzformationen vor. Es stehen langjährig erprobte Erkundungs- und Untersuchungsmethoden zur Verfügung (z. B. [Bornemann et al. 2008], [Bräuer et al., in Vorb.]). Steinsalz besitzt zahlreiche physikalische Eigenschaften, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle günstig sind (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Günstige endlagerrelevante Eigenschaften von Steinsalz

sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit ($< 10^{-21}$ m/s) und Porosität ($< 1\%$)
plastisches Verhalten (Kriechen) und Selbstheilung von auffahrungsbedingten Trennflächen (vollständiger Einschluss von Abfällen)
große räumliche Ausdehnung, d. h. große Mächtigkeit der geologischen Barriere
große Homogenität vieler Steinsalz-Vorkommen (z. B. Hauptsalz Staßfurt-Folge)
geringe Gehalte an wässrigen Lösungen
keine vernetzten Kluftsysteme
Fehlen eines advektiven und diffusiven Radionuklidtransports
hohe Temperaturleitfähigkeit
Abbau von thermischen Spannungen
sekundäre Barrieren durch Vorkommen von Tonschichten und -lagen in der Salzformation (z. B. Grauer und Roter Salzton sowie Tonmittelsalz)
kein technischer Ausbau der Auffahrungen notwendig
einfache bergmännische Auffahrung des Endlagerbergwerkes

In der Mehrheit der in Norddeutschland nachgewiesenen ca. 200 Salzstöcke werden in den Kernzonen ausreichend große Steinsalzbereiche angetroffen. Das in diesen Bereichen oft dominierende Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) ist durch mächtige, weitgehend homogene und anhydrit- bzw. tonmineralarme Steinsalzbildungen charakterisiert. Im aufgestiegenen Kernbereich von Salzstöcken werden geringe Fluidgehalte nachgewiesen (z. B. im Salzstock Gorleben $< 0,02$ Gew.-%, [Jockwer 1981]).

Flach lagernde Salzvorkommen sind im Gegensatz zu Salzstöcken oft durch Wechsellagerungen von Steinsalzschieben mit anhydritisch-karbonatischen, Kalisalz- oder auch tonigen Gesteinsschichten gekennzeichnet. Sie entsprechen meist nicht den für ein Endlager geforderten Kriterien (z. B. Mächtigkeit, Ausdehnung, etc.) und weisen häufig nicht die für den Endlagerbau erforderlichen Eigenschaften auf.

Aufgrund ihrer spezifischen Bildungsbedingungen (Salzabscheidung in einem periodisch vom Ozean abgeschnürten Meeresbecken) enthalten Salzformationen neben Steinsalz auch

tonige, karbonatische und vor allem anhydritische Einlagerungen sowie andere Salzminerale (z. B. Kalisalze). Neben der Ausweisung von Homogenbereichen für die Einlagerung der Abfälle, sind Analysen der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen Salzsichten und des geologischen Baustils der Salzformation (z. B. räumliche Anordnung von Anhydrit- und Kalisalzschichten) sowie die detaillierte Charakterisierung der Gesteinseigenschaften die Schwerpunkte der Standorterkundung.

Die in Salzstöcken außerhalb des „einschlusswirksamen Gebirgsbereiches“ (Begriffserklärung siehe [AkEnd 2002]) vorkommenden Tonschichten (z. B. Grauer Salzton, Roter Salzton) sowie Toneinlagerungen in Steinsalzschichten (z. B. Tonmittelsalz) wirken sich als zusätzliche geologische Barriere günstig auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Steinsalz aus. Diese Schichten der Salinarformation sind in der Lage, Radionuklide effektiv zu sorbieren.

Infolge seiner Bildungsbedingungen und Kriecheigenschaften werden im Steinsalz keine offenen, hydraulisch wirksamen Klüfte beobachtet. Steinsalz besitzt auch kein vernetztes Porenvolumen, d. h. es ist quasi undurchlässig bzw. nur sehr gering durchlässig (Permeabilität meist deutlich $< 10^{-21} \text{ m}^2$). Durch das Fehlen offener Klüfte sind keine freien Lösungsbewegungen möglich. Lediglich im Bereich der Auflockerungszonen um bergmännische Hohlräume herum werden höhere Permeabilitäten bis 10^{-15} m^2 bestimmt [Nowak & Weber 2002].

In bestimmten, meist Anhydrit-haltigen Salinarschichten können beim Salzaufstieg umverteilte intrasalinare Lösungen vorkommen [BfS 2002], [Schramm et al. 2009]. Die geologische Erkundung von Salzstöcken belegt, dass die Lösungen an vereinzelte, isolierte Kluftsysteme gebunden sind, die nicht miteinander vernetzt sind. Geochemische Analysen beweisen den primären, intrasalinaren Charakter der Lösungen. Die sehr geringen Lösungsvolumina und ihre intrasalinare Herkunft sind wichtige Belege für die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Steinsalz. In den Endlagerkonzepten weisen die für die HAW-Einlagerung vorgesehenen Steinsalzbereiche Mindestabstände (Sicherheitspfeiler) zu den möglicherweise lösungsführenden Schichten (z. B. Hauptanhydrit, Gorleben-Bank und Anhydritmittelsalz innerhalb der Leine-Folge) auf.

Die besondere Eignung von Steinsalz als Endlagerwirtsgestein wird auch dadurch unterstrichen, dass die bei Anlegen eines äußeren Spannungsfeldes oder bei steigenden Temperaturen (bei Wärmeeintrag durch ausgediente Brennelemente oder HAW-Kokillen) entstehenden Spannungen durch die viskoplastischen Eigenschaften des Steinsalzes abgebaut werden (siehe Kap. 3.2.1).

Günstig für die Nutzung von Steinsalzvorkommen in Salzstöcken als Endlagerwirtsgestein sind außerdem die gute Prognostizierbarkeit der Eigenschaften und der weiteren geologischen Entwicklung von Salzstöcken sowie die gute Explorierbarkeit des Aufbaus und der Wirtsgesteinseigenschaften mit langfristig erprobten Untersuchungsmethoden. Im Ergebnis umfangreicher Laborstudien und In-situ-Experimente liegen inzwischen ausreichende Kenntnisse zu den Barriereigenschaften von Steinsalz bei der HAW-Einlagerung vor (z. B. zur

thermischen Belastung und zur Diffusion von Gasen, die durch Korrosion entstehen könnten).

Als ungünstig für die Endlagerung wird in vielen Wirtsgesteinsvergleichen die hohe Wasserlöslichkeit von Steinsalz angesehen. Studien zum Ablaugungsverhalten von Salzstöcken im Verlaufe der Erdgeschichte belegen allerdings eine häufig sehr geringe Geschwindigkeit der Lösungs-/Ablaugungsprozesse im Bereich des Salzspiegels, insbesondere bei Salzstöcken mit niedrigen Aufstiegsgeschwindigkeiten, wie z. B. Gorleben. Die Grundwässer im tieferen Teil des Hutgesteins eines Salzstocks sind i. d. R. annähernd salzgesättigt und können deshalb wenn überhaupt nur noch wenig Salz lösen. Für den im finalen Diapirstadium befindlichen Salzstock Gorleben wurden mittlere Ablaugungsraten von 0,01 mm/a bestimmt [Bornemann et al. 2008].

3.1.2 Tongesteine

Tongesteine werden aufgrund ihrer Eigenschaften als prinzipiell geeignete Wirtsgesteine für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen angesehen. Die als günstig für die Langzeitisolation von radioaktiven Abfällen bewerteten Eigenschaften von Tongesteinen sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt. Die Barriereigenschaften von Tongesteinen werden von der Intensität der Diagenese bzw. Metamorphose (Einfluss der Versenkungsgeschichte), von der tektonischen Beanspruchung und der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der Tongesteine sowie von den geologischen Rahmenbedingungen bei der Bildung der Tonformationen (z. B. Liefergebiete, Sedimentationsbedingungen) bestimmt. Dadurch ergeben sich standortspezifische Unterschiede in den Barriereigenschaften von Tongesteinen.

Tabelle 3-3 Günstige endlagerrelevante Eigenschaften von Tongesteinen

geringe hydraulische Durchlässigkeit und niedrige Grundwasserfließgeschwindigkeiten (ca. 10^{-19} bis 10^{-22} m ² bzw. 10^{-13} m/s)
niedrige Porosität und geringe Porengrößen (meist zwischen 1 und 25 nm)
plastisches Verhalten und Selbstheilung von Klüften durch plastisches Fließen und Quellen
gute Puffer- und Sorptionseigenschaften (hohe Neutralisationskapazität)
reduzierende Bedingungen
stabiles hydrodynamisches Regime
Fehlen eines advektiven Radionuklidtransports und Dominanz von diffusiven Prozessen (Diffusionsgeschwindigkeit < ca. 10^{-12} m ² /s)

Relativ häufig sind Tonformationen infolge von Änderungen in den Ablagerungsbedingungen heterogen zusammengesetzt, weisen infolge differenzieller Absenkungen der Sedimentationsräume z. T. beträchtliche fazielle Unterschiede (Abbildung 3-1) sowie Mächtigkeitsschwankungen auf und führen sandige Partien bzw. Linsen, die sich negativ auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen auswirken.

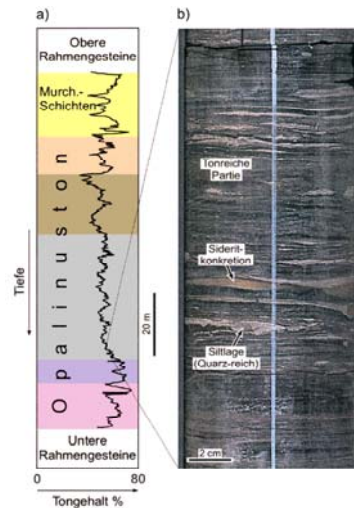


Abbildung 3-1: Schwankungen im Tongehalt (a) bzw. lithologische Inhomogenitäten (b) eines heterogen zusammengesetzten Teilabschnittes des Opalinustones der Schweiz, der generell als Beispiel für ein relativ homogenes toniges Wirtsgestein gilt [NAGRA 2002c]

Dadurch kann die mineralogisch-geochemische Zusammensetzung von Tonen, wie z. B. der Gehalt der einzelnen Tonminerale oder der Karbonatgehalt sehr stark schwanken (Abbildung 3-2), was Änderungen im Sorptionsvermögen und in den geomechanischen Eigenschaften sowie in der thermischen Stabilität der Tongesteine zur Folge hat.

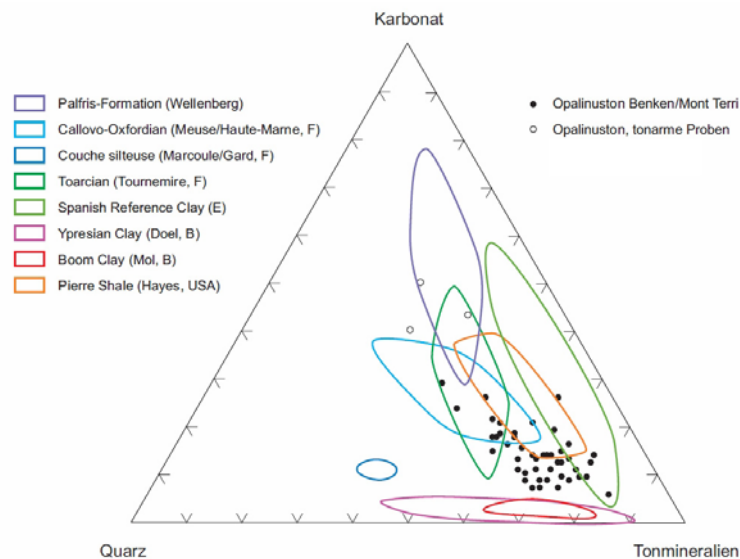


Abbildung 3-2: Variationsbreiten in der mineralogischen Zusammensetzung von weltweit vorkommenden tonigen Gesteinen [NAGRA 2002c]

Mit zunehmender Versenkungstiefe bzw. ansteigendem Diagenese-/Metamorphosegrad verlieren Tongesteine ihre Plastizität und sind häufig stärker geklüftet, d. h. es verändern sich die petrophysikalischen Eigenschaften (z. B. Porosität, Wassergehalt, Festigkeit, Verformungsverhalten) der Gesteine. Dadurch können Stofftransporte in Tongesteinen nicht nur

als Diffusionsprozesse, sondern auch als advective Vorgänge ablaufen und die Durchlässigkeiten der Tonsteinformationen können aufgrund von erhöhten Klüftigkeiten und Permeabilitäten deutlich zunehmen. Tongesteine können infolge dessen deutliche Anisotropien in ihren geomechanischen sowie hydraulischen Eigenschaften aufweisen. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die Standorterkundung und muss bei der Planung des Endlagerbergwerks und beim Langzeitsicherheitsnachweis beachtet werden.

Bei vergleichsweise hohen Wassergehalten in den Tongesteinen kann es bei Wärmeabgabe der Abfälle zur Freisetzung fluider Phasen (ca. 2-6 % der Gesamtmasse) kommen. Die Beurteilung der Barrierenintegrität in tonigen Gesteinen muss außerdem die durch Korrosion mit eingebrachten Ausbau- und Endlagermaterialien verursachte Gasentwicklung berücksichtigen.

Ungünstig für die Nutzung von Tongesteinen sind die im Vergleich zum Salz schlechtere interne Erkundbarkeit und Prognostizierbarkeit des Aufbaus und der Eigenschaften der Ton-schichten. Für Tongesteine ist im Vergleich zum Steinsalz ein deutlich höherer Aufwand für die Standortcharakterisierung (z. B. rastermäßiges Abbohren des potenziellen Endlagerstandortes), für die Optimierung der technischen bzw. geotechnischen Barrieren sowie für komplexe In-situ-Untersuchungen zur Analyse der Gesteins- und Gebirgseigenschaften erforderlich, z. B. zur Untersuchung von Transportprozessen für Radionuklide durch Diffusion.

Während das Prozessverständnis für die komplexen, in einem Endlager ablaufenden Vorgänge für das Wirtsgestein Steinsalz aufgrund langjähriger Forschungsarbeiten sehr weit entwickelt ist und durch entsprechende Modelle und Stoffgesetze beschrieben werden kann, sind die Untersuchungen in Tongesteinen noch nicht so weit fortgeschritten. In Tongesteinen laufen aufgrund ihrer mineralogischen Zusammensetzung komplexe gekoppelte thermische, hydraulische, mechanische und chemische Vorgänge (THMC) ab, d. h. es müssen Prozesse berücksichtigt werden, die im Steinsalz nicht relevant sind. Die bisherigen Arbeiten in Tongesteinen in der Schweiz und in Frankreich zeigen, dass noch Grunddaten ermittelt werden müssen, um entsprechende Modelle und Stoffgesetze weiter anzupassen bzw. weiter zu entwickeln.

3.1.3 Kristalline Gesteine

Insbesondere in Ländern auf alten kontinentalen Schilden mit fehlendem oder nur geringmächtigem sedimentärem Deckgebirge werden, häufig in Ermangelung anderer Wirtsgesteinsoptionen, Endlagerprojekte im Kristallin verfolgt (z. B. in Finnland, Schweden und Kanada). Die Möglichkeit der Nutzung von kristallinen Gesteinen zur Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle ergibt sich vor allem aus den in Tabelle 3-4 zusammengestellten Eigenschaften.

Tabelle 3-4: Günstige endlagerrelevante Eigenschaften von kristallinen Gesteinen

hohe Druckfestigkeit der Gesteine
hohe Standsicherheit bergmännischer Auffahrungen
großes Volumen von Magmatitkomplexen (d. h. ausreichender Platz bzw. viele Standortalternativen innerhalb von Intrusivkörpern)
relativ homogene Gesteinszusammensetzung im Zentralbereich von Magmatitkomplexen
hohe Wärmeleitfähigkeit und geringe thermische Ausdehnungskoeffizienten (geringe thermisch induzierte Spannungen in den Gesteinen)
niedriger Wassergehalt im ungestörten Gestein (< 0,5 %)
geringe Wasserlöslichkeit
sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit im ungestörten Gestein
schwach alkalische, meist gering mineralisierte und reduzierende Grundwässer (geringes Lösungsverhalten, schwaches Migrationsvermögen von Radionukliden)
sehr geringe Diffusionsgeschwindigkeiten innerhalb der Gesteinsmatrix
Bildung von sekundären Tonmineralen mit erhöhten Sorptionskapazitäten bei Verwitterung bzw. metasomatischer Überprägung kristalliner Gesteine

Aufgrund ihres spröden Verhaltens werden kristalline Gesteine im Verlauf ihrer geologischen Entwicklungsgeschichte meist intensiv deformiert und metamorphisiert, wodurch es zur Entwicklung von Störungs- und Kluftsystemen kommen kann (Abbildung 3-3). Neben den im Verlaufe der geologischen Entwicklung wieder geschlossenen bzw. verheilten Klüften können durch tektonische Aktivierungen dieser Systeme offene, miteinander vernetzte Klüfte vorkommen, die aktuelle oder zukünftig wirkende Wasserwegsamkeiten darstellen.

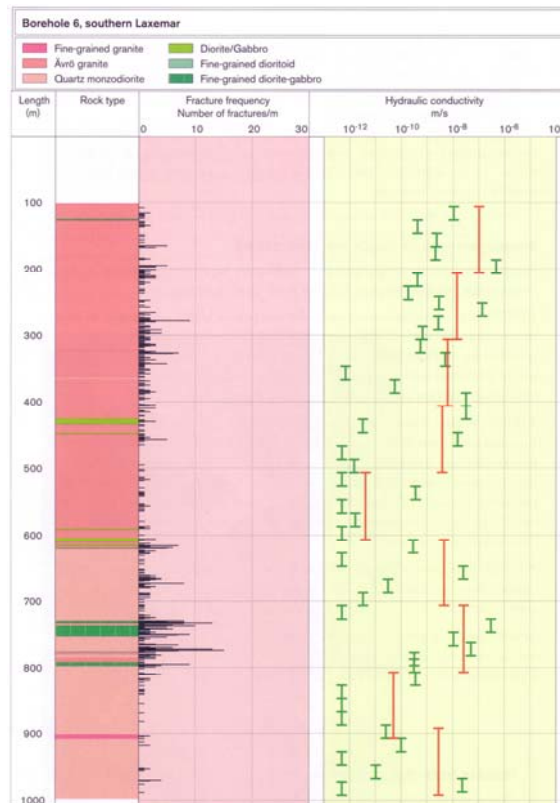


Abbildung 3-3: Variationen der Klufthäufigkeiten (links) und hydraulischen Durchlässigkeiten (rechts) in einer ca. 1000 m tiefen Erkundungsbohrung am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Oskarshamn (Quelle SKB)

Geohydraulische Messungen an mehreren potenziellen Endlagerstandorten zeigen, dass trotz generell mit der Teufe abnehmender Durchlässigkeiten in Kristallingebieten auch in größeren Tiefen noch stark durchlässige Störungs- und Kluftezonen existieren können, die ein eingeschränktes Isolationspotenzial der geologischen Barriere zur Folge haben (ausführlicher siehe [Hammer et al. 2009]).

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit eines HAW-Endlagers im Kristallin ist kritisch, dass die Durchlässigkeit und Wasserführung von Kristallingesteinen oftmals räumlich stark variieren und damit kompliziert zu erkunden sowie schwer in ihrer weiteren Entwicklung zu prognostizieren sind. Trotz aufwändiger Standortuntersuchungen liegen in vielen Fällen nur ungenaue Kenntnisse zu den bestehenden Kluftsystemen oder Störungszonen und zu ihrer Vernetzung vor. Das Vorkommen von wasserführenden, hydraulisch aktiven Störungszonen führt dazu, dass im Kristallin im Unterschied zum Steinsalz und plastischen Tongestein nicht mehr die Diffusion den maßgebenden Prozess für den Radionuklidtransport darstellt, sondern die Advektion, mit deutlich höheren Grundwasserfließgeschwindigkeiten. Die detaillierte Charakterisierung der Kluft- bzw. Störungssysteme in den Gesteinen stellt folglich einen wesentlichen Teil der Standorterkundung dar.

Kristallingesteine sind aufgrund ihrer Festigkeitswerte in der Regel durch eine hohe Standsicherheit der bergmännischen Hohlräume charakterisiert, wodurch mit Ausnahmen von Störungszonen meist kein spezieller Ausbau erforderlich ist. Je nach Standort und Teufe

können allerdings sehr hohe Gebirgsspannungen vorliegen, die negative Auswirkungen auf die Standsicherheit eines Teils der untertägigen Hohlräume und die Gebirgsdurchlässigkeit haben (siehe [Hammer et al. 2009]). Die Bestimmung der Orientierung und der Höhe der Gebirgsspannungen sowie die Erfassung der Änderungen des Spannungsfeldes mit der Tiefe bzw. mit fortschreitender Zeit sind daher wichtige Untersuchungsziele bei der Standorterkundung. Die dadurch möglicherweise verursachten Änderungen in den Barriereigenschaften der Gesteine müssen bei der Planung bzw. Durchführung der bergmännischen Auffahrungen sowie bei ingenieurgeologischen Berechnungen und geomechanischen bzw. Transportmodellierungen berücksichtigt werden. Nachteilig sind der im Vergleich zum Steinsalz höhere Auffahrungsaufwand und die Entwicklung von Auflockerungszonen (EDZ) mit signifikant höheren Durchlässigkeiten im Umfeld der Auffahrungen.

Die in kristallinen Gesteinen meist gering mineralisierten (z. B. 0,9 bis 1,4 g/l; NAGRA 2005) sowie schwach alkalischen und schwach reduzierenden Grundwässer können nur eine geringe Korrosion der Endlagerbehälter hervorrufen und weisen eine niedrige Radionuklid-Löslichkeit auf. Trotz sekundärer Mineralbildungen bei Alterationsprozessen verfügen kristalline Gesteine im Unterschied zu Steinsalz und plastischem Tongestein über kein kurzfristig wirksames Selbstheilungs- oder Selbstabdichtungsvermögen. Thermische Einträge haben auf kristalline Gesteine nur einen geringen Einfluss, sie können aber durch thermisch induzierte Dichteströmungen den möglicherweise stattfindenden Radionuklidtransport und das Wärmefeld in Kluftwasserleitern beeinflussen.

3.2 Einfluss der Wirtsgesteinseigenschaften auf die Endlagerkonzepte

In Abhängigkeit von den endlagerrelevanten Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteinstypen und den geologischen Standortgegebenheiten wird die Hauptbarrierenwirkung entweder von der geologischen oder von den technischen bzw. geotechnischen Barrieren übernommen. Endlagerkonzepte für Steinsalz oder plastisch reagierende Tongesteine basieren aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeiten und der Kriecheigenschaften auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle, d. h. vor allem auf der Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere. Es wird davon ausgegangen, dass die Intaktheit der technischen und geotechnischen Barrieren im Steinsalz bis zur ausreichenden Kompaktion des Versatzes und im Tonstein ca. eintausend Jahre [NAGRA 2002b] gegeben sein muss. Schwerpunktmäßig muss das Wirtsgestein durch seinen strukturellen Aufbau bzw. seine mineralogisch-geochemischen Eigenschaften die Langzeitisolation der Abfälle gewährleisten. Wenn die geologische Barriere, zumindest wie bei der Endlagerung im Steinsalz, die Hauptlast bei der Gewährleistung der Sicherheit eines Endlagers trägt, steigen die Anforderungen an die geologische Barriere und damit an die Standortauswahl und -charakterisierung.

Für Endlagerkonzepte in Kristallingesteinen ist aufgrund der möglicherweise komplizierten, in ihrer langzeitlichen Entwicklung nur schwer vorhersehbaren Kluft- und Störungsnetzwerke sowie der oft schwierigen Strömungsverhältnisse in Kluftgrundwasserleitern vor allem der Nachweis der Langzeitbarrierenwirkung der technischen und geotechnischen Barrieren erforderlich (Behälter, Bentonitversatz). Das Radionuklid-Rückhaltevermögen der geologischen Barriere ist eingeschränkt und ihr Beitrag zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit des

HAW-Endlagers ist im Kristallin im Vergleich zum Salz oder plastischen Ton deutlich reduziert.

Bei einer Gegenüberstellung der verschiedenen Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Ton/Tonstein und Kristallin ergeben sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der geologisch-geotechnischen Rahmenbedingungen sowie der Vorgaben für die Auslegung, die Errichtung und den Betrieb der Endlagerbergwerke (Abbildung 3-4).

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

günstige Eigenschaft
 ungünstige Eigenschaft
 mittel

* wird an das jeweilige Wirtsgestein angepasst

Abbildung 3-4: Zusammenfassung der Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen [BGR 2006, aktualisiert]

3.2.1 Steinsalz

Endlagerkonzepte für Steinsalz basieren auf der sehr geringen Durchlässigkeit und den Kriecheigenschaften von Steinsalz sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit. Während der Betriebsphase garantieren geotechnische Barrieren (Versatz, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschluss) und die technische Barriere, d. h. die Endlagergebinde, die radiologische Sicherheit. Aufgrund des zunehmenden Kriechvermögens von Steinsalz bei erhöhten Temperaturen soll in der Nachbetriebsphase langfristig der vollständige Einschluss der eingelagerten Abfälle durch das Wirtsgestein Steinsalz erfolgen. Diese Besonderheit erleichtert den Langzeitsicherheitsnachweis für Endlagerprojekte im Steinsalz, da im Unterschied zu Kristallin- oder stärker metamorphisierten Tongesteinen auch deutliche Veränderungen in

den regionalen Spannungsverteilungen nicht dazu führen können, dass im Steinsalz neue, langfristig geöffnete Klüfte entstehen.

Eine wesentliche Besonderheit des Endlagerkonzeptes für Steinsalz ist, dass die geringere Temperaturempfindlichkeit und die im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinstypen doppelt bis dreimal so hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz sowie der Verzicht auf Bentonit als geotechnische Barriere eine kürzere Zwischenlagerzeit der Abfälle und eine stärkere räumliche Konzentration der Abfälle ermöglicht. Das hat für das Endlager im Vergleich zu Endlagerkonzepten in Tongesteinen oder im Kristallin einen geringeren Platzbedarf zur Folge [Filbert et al. 2004], [Jobmann et al. 2007].

Hohlräume können im Steinsalz relativ einfach bergmännisch aufgefahren werden. Sie besitzen zudem eine hohe Standsicherheit, wodurch im Unterschied zu Tongesteinen auf spezielle technische Ausbaumaßnahmen verzichtet werden kann. Dadurch werden zusätzliche Probleme bei der Gewährleistung der Langzeitsicherheit des Endlagers (verursacht durch die Ausbaumaterialien) vermieden und die Kosten des Endlagerbaus deutlich reduziert.

Aufgrund des hohen Kriechvermögens von Steinsalz und des festen Einschlusses der eingelagerten Endlagerbehälter müssen die Behälter mechanisch auf den herrschenden Gebirgsdruck ausgelegt sein. Im deutschen Referenz-Endlagerkonzept für Steinsalz ist eine Rückholung der Abfälle nicht vorgesehen [Filbert & Engelmann 1998]. Technisch ist eine Rückgewinnung der Behälter aus Steinsalz möglich.

3.2.2 Tongesteine

Das Einlagerungskonzept für HAW in Tongesteinen ist stark abhängig von den standortspezifischen Gesteinseigenschaften, die sich aus der Lithologie, dem Gefüge und dem Diagenese-/Metamorphosegrad ergeben. Günstige Eigenschaften haben verfestigte Tonsteine (in Europa meist mesozoischen Alters) mit hohem Tonanteil, die sich abseits von großen Bruchstrukturen befinden und einen mittleren Diageneseegrad aufweisen. Stärker diagenetisch oder metamorph überprägte Tonsteine oder Tonschiefer neigen zur Kluftbildung und Schieferung, mit ähnlichen Konsequenzen für das Endlagerkonzept wie bei kristallinen Wirtsgesteinen (zusätzliche Bentonitbarriere und längere Containerstandzeiten erforderlich).

Für Endlager in plastischen Tönen sind meist sehr aufwändige Ausbau- und Sicherungsmaßnahmen notwendig, an die langzeitliche Unsicherheiten bezüglich der Wechselwirkungen zwischen den Ausbaumaterialien und dem Wirtsgestein gebunden sein können. Die im belgischen Endlagerkonzept ausgewählten Tertiärtone sind infolge ihrer geringen Versenkungstiefe durch niedrige Druckfestigkeiten und eine hohe Plastizität charakterisiert (z. B. [Mazurek et al. 2003]). Dies hat zwar eine Selbstheilung von Rissen, Störungszonen und Auflockerungszonen, d. h. eine deutliche Reduzierung möglicher advektiver Radionuklidtransporte zur Folge, verursacht aber auch eine geringe Standsicherheit der bergmännischen Auffahrungen sowie zahlreiche daran gebundene ingenieurgeologische

Probleme, was hohe Aufwendungen für den Bergwerksbau (massiver Streckenausbau erforderlich) zur Folge hat. Oberflächennah, bis in Tiefen von ca. 200 – 300 m lagernde Tonschichten können intensiven Erosionsprozessen, z. B. in Form von Rinnenbildungen während einer Inlandvereisung oder als Folge tiefer Erosionstätigkeit von Flüssen, ausgesetzt sein. Dies kann zu deutlichen Beeinträchtigungen der Barriereigenschaften der Gesteine führen [Keller 2009].

Die sehr geringe Hohlraumstabilität in plastischen (oberflächennah lagernden) Tonformationen und langzeitsicherheitliche Überlegungen (möglichst großer Abstand zur Biosphäre) sprechen für den Endlagerbau in tief gelegenen Tongesteinen. Allerdings erhöhen sich mit zunehmender Teufe der Verfestigungs- bzw. Metamorphosegrad der Tongesteine, der Gebirgsdruck und die Gebirgstemperatur, was zunehmende bergbauliche bzw. geotechnische Probleme und höhere Kosten des Endlagers verursacht. Günstige Gesteinseigenschaften liegen in Tonsteinformationen in der Regel in Teufen zwischen 300 m und 800 m Teufe vor.

Die geringere Temperaturdifferenz zwischen Endlagerbehälter und Maximalbelastung des Bentonitbuffers bzw. des Tongesteins (90 °C; zum Vergleich Steinsalz: 200 °C) erfordert längere Zwischenlagerzeiten sowie größere Abstände zwischen den Containern und den Einlagerungsbohrungen bzw. -strecken. Dies hat größere Dimensionen des geplanten Endlagers zur Folge [Jobmann et al. 2007], die im Ergebnis der Standorterkundung nachgewiesen werden müssen.

Der Wärmeeintrag durch die Abfälle kann zu einer Beeinträchtigung der Barrierenintegrität durch wärmeinduzierte Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung sowie der physikochemischen und geomechanischen Eigenschaften der Tonminerale führen. Dies geht möglicherweise einher mit einer Abnahme des Sorptionsvermögens und einem zumindest partiellen Verlust der plastischen Gesteinseigenschaften. Durch die Wärmeabgabe der Endlagerbehälter kann es zu Schrumpfungen des Tongesteins kommen, was zur Entstehung von Klüften und damit zur Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit führt.

3.2.3 Kristalline Gesteine

Im Unterschied zu den Endlagerkonzepten in Tonstein und Steinsalz kann bei der Endlagerung im Kristallin nicht von einem vollständigen Einschluss der Abfälle durch das Wirtsgestein ausgegangen werden. Mögliche Einschränkungen im Isolationspotenzial der geologischen Barriere werden maßgeblich durch die vorhandenen Kluft- bzw. Störungssysteme und ihre zukünftige Entwicklung bestimmt. Demzufolge ist der Beitrag der geologischen Barriere zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit des HAW-Endlagers im Vergleich zum Salz oder plastischen Ton deutlich reduziert. Aufgrund dessen ist vor allem die Optimierung der Langzeitwirkung der technischen und geotechnischen Barrieren (Behälter, Bentonitversatz) durch aufwändige In-situ- und Laborversuche erforderlich.

Ein Schwerpunkt bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten für kristalline Gesteine ist die Analyse der Wechselwirkungen der geotechnischen Barrieren bzw. der eingebrachten Materialien mit dem Gebirge (z. B. Gasentwicklung durch Korrosion). Obwohl kristalline Gesteine

selbst keine hohen Temperaturempfindlichkeiten aufweisen, gelten aufgrund des Einsatzes von Bentonit als geotechnischer Barriere (Abschirmung von Grundwasserzutritten und Sorption von möglicherweise aus den Endlagerbehältern austretenden Radionukliden) ähnliche Einschränkungen in Bezug auf die maximal mögliche Temperaturbelastung wie bei Tongesteinen (maximal 90 – 95 °C). Dies wird durch die Entwicklung spezieller Behältertypen, Änderungen in der Behälterbeladung und -zwischenlagerzeit sowie durch eine Verlängerung des Abstandes zwischen den Endlagerbehältern (verbunden mit einer Zunahme der Endlagergröße) erreicht.

An vielen Kristallinstandorten haben häufig zu beobachtende Wechsel in der petrographischen Zusammensetzung und in den physikalischen Eigenschaften der Gesteine sowie in der Intensität ihrer Deformation entscheidenden Einfluss auf die Planung des Endlagers und die sichere Dimensionierung der geotechnischen Barrieren. Ein Endlager in kristallinen Gesteinen muss infolge dieser Ungewissheiten häufig in mehrere Bereiche aufgeteilt werden, was einen großen Flächenbedarf und hohe Kosten für den Endlagerbau zur Folge hat.

In Endlagerkonzepten für kristalline Gesteine sind hinsichtlich der Standsicherheit der untertägigen Hohlräume in der Regel keine zusätzlichen Ausbaumaßnahmen erforderlich. Es können aber unter Umständen sehr hohe Gebirgsspannungen auftreten, die im Endlagerkonzept berücksichtigt werden müssen. Weiterhin sind vorsorglich Maßnahmen zur Gefahrenabwehr für den Fall zu planen, dass im Verlaufe des Endlagerbaus mächtige, hydraulisch aktive Störungszonen aufgeschlossen werden, an die signifikante Grundwasserzuflüsse gebunden sind.

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

In den Endlagerkonzepten für kristalline und tonige Wirtsgesteine ist die Rückholbarkeit der Abfälle in der Betriebs- und kontrollierten Nachbetriebsphase vorgesehen (z. B. [NAGRA 2002b]). In Anhang 2 zu diesem Bericht sind weitere Informationen zu den vorgenannten Wirtsgesteinseigenschaften und deren Einfluss auf eine Standortsuche und -erkundung und die Endlagerkonzepte zusammengestellt.

4 Standortauswahl und Standorterkundung

4.1 Anforderungen und Auswahlkriterien für Endlagerstandorte

Mit Ausnahme der Schweiz geht es in allen aktuell mit Endlagerprojekten befassten Ländern nicht um die Suche nach dem landesweit „besten“ Standort, sondern um die Auswahl eines geeigneten Endlagerstandortes, der eine Gefährdung von Mensch und Umwelt sicher ausschließen lässt (siehe [Hammer et al. 2009]). Dabei erfolgt die Standortsuche nach Regeln, die im Vorfeld des Auswahlprozesses festgelegt wurden, und unter streng vorgegebenen Rahmenbedingungen, die neben geowissenschaftlichen auch raumordnerische und sozio-ökonomische Auswahlkriterien berücksichtigen.

Als Grundlage für die Ableitung der Standortanforderungen für HAW-Endlager dienen die prinzipiell möglichen Freisetzungsmechanismen von Radionukliden aus Endlagern, d. h. die geologischen Ereignisse, die die Sicherheit eines Endlagers aktuell oder in Zukunft beeinträchtigen können. Dazu zählen die Freilegung des Endlagers durch Erosion bzw. Hebung in den Bereich aktiver Fließbewegungen oxidierender Grundwässer, die Zerstörung des Endlagers durch tektonische Prozesse sowie die Schädigung bzw. Zerstörung der geologischen Barriere durch Veränderungen des regionalen oder lokalen Spannungsfeldes (Öffnung bereits vorhandener Kluftsysteme oder Bildung neuer Klüfte durch geotektonische Prozesse in benachbarten Regionen). Weitere mögliche Szenarien sind die Zerstörung des Endlagers sowie der Transport der Radionuklide durch magmatische Schmelzen oder postmagmatische Fluide, der Austrag der Radionuklide durch Grundwässer, die aus dem Deck- bzw. Nebengebirge in das Endlager migrieren, sowie die bewusste oder unbewusste Öffnung des Endlagersystems durch bergmännische oder geologische Arbeiten.

Ausgehend von den genannten Szenarien wurden die in Tabelle 4-1 zusammengestellten wirtsgesteinsunabhängigen geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien für HAW-Endlagerstandorte abgeleitet (z. B. [AkEnd 2002]).

Tabelle 4-1: Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien für HAW-Endlagerstandorte

quartärer oder zukünftiger Vulkanismus
intensive seismische bzw. geodynamische Aktivitäten
mächtige, hydraulisch aktive Störungszonen
große Hebungs- und Erosionsraten
Rohstoffvorkommen im Bereich des geplanten Endlagers
konkurrierende Nutzung des Standortes (z. B. Erdgas- und Grundwasserförderung, Gasspeicherung, Geothermie)

Zusätzlich zu diesen Ausschlusskriterien wurden unter Zugrundelegung generischer Langzeitsicherheitsanalysen und vorläufig erstellter Endlagerkonzepte die in Tabelle 4-2 erfassten, weitgehend wirtsgesteinsunabhängigen Mindestanforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation erarbeitet ([AkEnd 2002] – leicht geändert).

Tabelle 4-2: Geowissenschaftliche Mindestanforderungen an HAW-Endlagerstandorte

Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches > 100 m
Tiefenlage > 300 m u GOK, aber nicht tiefer 1000 m u GOK
ausreichende flächige Ausdehnung
Langzeitstabilität und langfristige Wirkung der geologischen Barriere
keine Gefährdung durch Gebirgsschläge
gute Explorierbarkeit
<u>Wirtsgesteinseigenschaften</u> Gebirgsdurchlässigkeit < 10 ⁻¹⁰ m/s hohe Standfestigkeit homogene Zusammensetzung hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide gute Wärmeleitfähigkeit geringe thermische Ausdehnung geringe Anisotropie in den Gesteinseigenschaften
gute Prognostizierbarkeit der weiteren geologischen Entwicklung
technische Machbarkeit des Endlagers

Ungeachtet einiger länderspezifischer Besonderheiten unterscheiden sich die den Standortauswahlprozessen zugrunde gelegten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen international nur wenig. Parallel zur Nutzung der genannten geowissenschaftlichen Standortanforderungen führt die Anwendung raumordnerischer, sozial- und umweltpolitischer sowie ökonomischer Kriterien zu weiteren Einschränkungen bei der Abgrenzung untersuchungswürdiger Gebiete. Dazu zählen z. B. die Bevölkerungsdichte, die Infrastruktur und die Nähe zu Natur- und Landschaftsschutzgebieten.

Erfahrungen aus den weltweit durchgeführten Standortsuchverfahren zeigen, dass bei Zugrundelegung der in Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 genannten Auswahlkriterien häufig mehrere Standorte prinzipiell, d. h. aufgrund generischer Modellbetrachtungen und noch vor Durchführung detaillierter Standorterkundungsarbeiten bzw. standortbezogener Langzeitsicherheitsnachweise, für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet sind. Die für die endgültige Standortauswahl erforderliche detaillierte Standortcharakterisierung basiert auf übertägigen und nachfolgend untertägigen Erkundungsarbeiten. In Anbetracht der Kosten einer untertägigen Standortcharakterisierung (die Erkundung des Standortes Gorleben hat bis Oktober 2000 ca. 1,3 Mrd. Euro gekostet), sollte bei der detaillierten Erkundung von Standortalternativen sukzessive vorgegangen werden, entsprechend der festgelegten Reihenfolge der Standorte im Ergebnis früherer Phasen des Standortauswahlprozesses.

Aufgrund der Unterschiede in den Eigenschaften und im geologischen Bau der verschiedenen Wirtsgesteinsformationen werden in späten Phasen der Standortsuche neben den genannten wirtsgesteinsunabhängigen Auswahlkriterien (Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2) auch gesteinstypabhängige Standortanforderungen berücksichtigt. Die Anwendung dieser wirtsgesteinsspezifischen Abwägungskriterien setzt z. T. sehr detaillierte standortbezogene

Kenntnisse voraus, die nicht flächendeckend vorliegen und meist erst im Ergebnis spezieller geologischer, geophysikalischer und geotechnischer Erkundungsarbeiten gewonnen werden müssen. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteine unterscheiden sich die jeweiligen Auswahlkriterien.

Die maßgeblichen, unter Berücksichtigung des Endlagerkonzepts zusammengestellten, wirtsgesteinsspezifischen Kriterien für die Vorauswahl eines HAW-Endlagerstandortes in **Salzformationen** sind in Tabelle 4-3 enthalten.

Tabelle 4-3: Spezielle Auswahlkriterien für Salzformationen, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen

Mindestmächtigkeit der Salzformation – 500 m [Richter-Bernburg & Hofrichter 1964], [Jaritz 1983]
Mindestfläche – 3 km ²
Lage Top Salzstruktur in ca. 300 m Tiefe
Lage geplanter Einlagerungsbereich oberhalb 1200 m Tiefe
unverritzter Salzstock (keine Bergbauaktivitäten)
Salzstock nicht zu klein und nicht rund bzw. schwach oval (d. h. Ausschluss von Salzstöcken mit sehr kompliziertem Internbau)
geringe Salzmächtigkeiten in Randsenken (geringe zukünftige Aufwärtsbewegung)
keine mächtigen Störungszonen im Liegenden der Salzstruktur
möglichst nur gering entwickeltes Scheitelgrabensystem im Deckgebirge
keine Überschiebungstektonik und Fehlen intensiver Kompressionstektonik
große, weitgehend homogene Steinsalzbereiche innerhalb der Salzstruktur
möglichst geringe Gehalte von Kalisalzen

Zur Erhöhung der Langzeitsicherheit gelten bei der Standortauswahl z. B. ein geeigneter Internbau des Salzstocks (große Homogenbereiche) und ein spätes Entwicklungsstadium der nicht zu oberflächennah positionierten Salzstruktur als günstige Standortbedingungen. Die natürlichen Ablaugungsprozesse werden in den Endlagerkonzepten für Salz durch eine Mindestmächtigkeit des Deckgebirges von ca. 300 m sowie durch eine ausreichende Mächtigkeit der Salzbarrieren zwischen Einlagerungssohle und Deck- bzw. Nebengebirge berücksichtigt.

Ein besonders wichtiges Auswahlkriterium bei der Standortsuche für ein HAW-Endlager im Steinsalz ist die Unverritztheit der Salzlagerstätte. Damit werden alte Salzbergwerke ausgeschlossen, für die in vielen Fällen "Absauf-Szenarien" festgestellt wurden. Diese sind in der Regel auf intensiven Salzbergbau im Top- bzw. Randbereich von Salzstöcken bzw. auf die Nichtbeachtung von Sicherheitsabständen zum grundwasserführenden Deck- und Nebengebirge zurückzuführen.

Geeignete Standorte für die Errichtung eines HAW-Endlagers in **Tongesteinen** müssen die in Tabelle 4-4 aufgeführten spezifischen Eigenschaften aufweisen.

Tabelle 4-4: Spezielle Auswahlkriterien für Tongesteine, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen

Mindestmächtigkeit der Tonsteinformation – 100 m [Hoth et al. 2007]
Mindestfläche größer 10 km ² [Jobmann et al. 2007]
Tiefe größer 300 m und kleiner 1000 m u GOK
möglichst flache (subhorizontale) Lagerung der Tonformation
keine Tonschiefer, d. h. keine intensiv metamorph überprägten tonigen Gesteine
keine Gebiete mit erhöhtem geothermischem Gradienten
keine mächtigen Störungszonen im Deckgebirge und in der Tonformation selbst
möglichst nicht in unmittelbarer Nähe von Salzstrukturen, da dort häufig eine steile Lagerung der Tonschichten zu beobachten ist
möglichst geringe C _{org} -, Karbonat- und Wassergehalte zwecks Reduzierung von Alterations- und Gasbildungsprozessen bei Einlagerung der Abfälle
möglichst hohe Gehalte an Tonmineralen mit großem Sorptionsvermögen (z. B. Montmorillonit anstelle von Illit oder Sericit)

Die Auflistung der Standortanforderungen in **kristallinen Gesteinen** (Tabelle 4-5) zeigt, dass die Ausweisung potenziell geeigneter Standortregionen vor allem auf der Grundlage struktur- und hydrogeologischer Informationen erfolgt. Die Auswahl stützt sich insbesondere auf Daten zur Verteilung und zu den hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen sowie zur Klüftigkeit der Gesteine.

Tabelle 4-5: Spezielle Auswahlkriterien für Kristallingesteine, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen

Tiefe größer 300 m und kleiner 1200 m
Mindestfläche größer 10 km ²
Geologisch ruhiges Gebiet auf tektonischen Platten („altes Plattformgebiet“), möglichst keine Hinweise auf intensive alpidische bzw. variszische Orogenesen
geringe neotektonische Aktivitäten (z. B. Seismik, Hebungen, etc.)
geringe Klüftung und Ausschluss von Gebieten mit mächtigen Störungszonen
niedrige sowie nur schwach mit der Teufe variierende und in ihrer räumlichen Orientierung möglichst stabile Gebirgsspannungen
keine Rand- bzw. Kontaktbereiche von Magmatitkomplexen
geringe Häufigkeit von magmatischen Gängen und Xenolithen
homogene Zusammensetzung und geringe Anisotropie der Eigenschaften

geringe Grundwasserneubildungsrate, möglichst niedriger Grundwasserspiegel und großer Abstand zum Vorfluter

möglichst intensiv metasomatisch überprägte Gesteine (Tonmineralbildung, besseres Sorptionsvermögen), wobei die Alterationsprodukte nicht auf rezente, sondern auf erdgeschichtlich ältere Prozesse zurückgeführt werden

4.2 Standortsuche und Standortvorauswahl

Die weltweit in zahlreichen Ländern durchgeführten Standortauswahlverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Vorgehensweisen und der eingesetzten Untersuchungsmethoden. Es existiert kein international vereinbarter Standard für die Durchführung eines Endlager-Standortauswahlverfahrens. In den diesbezüglichen Unterlagen der IAEA [IAEA 1994], [IAEA 2003] wurden lediglich allgemeine Vorgaben zum Auswahlverfahren für einen Endlagerstandort für radioaktive Abfälle zusammengestellt, konkrete Handlungsempfehlungen fehlen.

Aufgrund spezifischer geologischer Gegebenheiten (z. B. Vorkommen unterschiedlicher potenziell geeigneter Gesteinstypen, Fehlen von Wirtsgesteinsalternativen, Ausschluss von Landesteilen infolge seismischer oder vulkanischer Gefährdungen), unterschiedlich gewichteter Auswahlkriterien sowie verschiedenartiger rechtlicher, verwaltungstechnischer und politischer Vorgaben für den Standortauswahlprozess, variieren Inhalt und Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte. In den letzten Jahren werden bei den Auswahlverfahren zunehmend Transparenz und die Beteiligung der Öffentlichkeit gefordert. In die, in den 1970er Jahren durchgeführten Standortauswahlverfahren (z. B. in den USA und in Deutschland) wurde die Fachöffentlichkeit eingebunden. Eine breite Beteiligung der Bevölkerung am Auswahlverfahren war nicht Stand von Wissenschaft und Technik (siehe Kap. 4.3).

Viele Länder, die sich mit Endlagerprojekten beschäftigen, haben sich, ausgehend von den jeweiligen geologischen Voraussetzungen oder von im Vorfeld festgelegten Rahmenbedingungen, von Anfang an auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp festgelegt (z. B. Schweden/Finnland auf Kristallin, Deutschland, Niederlande und Polen auf Steinsalz, Belgien auf Ton). Derartigen Entscheidungen sind umfangreiche Vergleiche der national in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen oder politisch bzw. raumordnerisch motivierte Vorfestlegungen vorausgegangen (ausführlicher siehe [Hammer et al. 2009]).

Zahlreiche Länder (z. B. Russland, Schweden, Finnland, Kanada und Japan) haben per politischem Beschluss festgelegt, dass die radioaktiven Abfälle zur Vermeidung unnötiger Transporte und zur besseren Kontrolle des Umgangs mit ihnen in unmittelbarer Nähe zu den Abfallverursachern (z. B. Produzenten von Kernbrennstoffen, Wiederaufarbeitungsanlagen, Kernkraftwerke, Kernforschungszentren, militärische Altlasten) endzulagern bzw. einer Langzeitlagerung zuzuführen sind. Damit soll der Entsorgungszyklus von der Abfallentstehung bis zur Endlagerung territorial und organisatorisch konzentriert werden. Dies bedeutet praktisch einen Verzicht auf ein landesweites Auswahlverfahren. Es wird im Umfeld dieser Einrichtungen nach Standorten gesucht, die eine langfristig sichere Entsorgung der Abfälle gewährleisten.

Eine Auswertung der weltweit durchgeführten Standortauswahlverfahren zeigt [Hammer et al. 2009], dass in den meisten Ländern nur ein sehr formaler Standortvergleich stattfand. Häufig wurde er durch dirigistische Eingriffe des Staates abgebrochen. So z. B. erfolgte in den USA die Auswahl des WIPP-Standortes aufgrund des militärischen Charakters der Anlage ohne einen im Vorfeld der Entscheidung öffentlich diskutierten Alternativenvergleich. In Frankreich wurde im Rahmen eines politisch initiierten Suchverfahrens, in dem sich Departments um die Errichtung eines HAW-Endlagers bewerben konnten, ein potentiell geeigneter Standort ausgewählt. Das in der Schweiz laufende Auswahlverfahren berücksichtigt zwar Mindest- sowie erweiterte Kriterien und führt eine umfangreiche Bewertung verschiedener Gebiete durch, die Auswahl wird aber durch die geringe Flächenausdehnung des Wirtsgesteins Opalinuston stark eingeschränkt.

Allen weltweit durchgeführten Standortauswahlverfahren ist gemeinsam, dass ein mehrstufiges Vorgehen („stepwise approach“) mit schrittweiser Selektion der in Frage kommenden Regionen erfolgte. Die einzelnen Phasen des Standortauswahlprozesses bauen aufeinander auf, beginnend mit der Abgrenzung großer geologisch-tektonischer Blöcke bis hin zur Festlegung des endgültigen Endlagerstandortes. Bei Erkundungsbefunden, die die Langzeit-sicherheit der Endlagerregion bzw. des geplanten Endlagerstandortes entscheidend in Frage stellen, sind fast immer Rücksprünge in vorherige Auswahlstadien vorgesehen.

In den meisten Ländern liegen die, für die Anwendung der in Kap. 4.1 zusammengestellten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erforderlichen Informationen beim Start des Auswahlverfahrens zumindest teilweise vor. Daten der Geologischen Dienste und aus Untersuchungsprogrammen zur Rohstoffexploration ermöglichen den Ausschluss von Gefährdungszonen und die Auswahl geeigneter Standortregionen. Wenn erforderlich, werden diese Daten gezielt neu ausgewertet bzw. reprozessiert. Liegen die notwendigen Kenntnisse für die Anwendung der Kriterien noch nicht vor, so müssen sie z. B. durch die Auswertung geologischer u. a. Karten bzw. Berichte neu generiert oder ggf. durch ergänzende geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten gewonnen werden.

Die geowissenschaftlichen Arbeiten zur Standortvorauswahl umfassen vor allem die in Tabelle 4-6 zusammengestellten Untersuchungen (ausführlicher in [Hammer & Sönke 2009]).

Tabelle 4-6: Geowissenschaftliche Untersuchungen im Verlaufe früher Phasen der Standortsuche (Standortvorauswahl)

Auswertung der seismischen Aktivitäten in den Standortregionen durch gezielte Abfragen bei nationalen und internationalen Mess- bzw. Beobachtungsnetzen
Zusammenstellung der verfügbaren Informationen zur geodynamischen Entwicklung der betrachteten Standortregionen und zu den regionalen Spannungsfeldern
Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Ausweisung von tiefen und großflächig ausstreichenden Störungszonen
Auswertung bereits vorhandener oder Neuerstellung topographischer, geomorphologischer und geologischer Karten zur Abgrenzung von mächtigen Störungszonen sowie zum Nachweis lithologischer Grenzen und bereits bestehender Nutzungen (z. B. Tunnel, Schächte, Stollen, Tagebaue) bzw. von Rohstoffvorkommen
GPS- bzw. Satelliten-gestützte Erfassung von Vertikal- und Horizontalverschiebungen einzelner geologischer Blöcke zwecks Bewertung ihrer Hebungs- bzw. Absenkungstendenzen bzw. ihrer räumlichen Lageänderungen
kleinmaßstäbige (z. B. 1 : 200.000) aerogeophysikalische oder an der Erdoberfläche durchgeführte geophysikalische Messungen zwecks Abgrenzung von Störungszonen sowie zur Entwicklung erster Vorstellungen zum geologischen Tiefenbau, zum Deckgebirge und zur Verteilung unterschiedlicher Gesteine
spezielle Auswertung von bisher nicht genutzten Archivunterlagen, Bohrungsdaten bzw. Datenbanken zwecks Ermittlung von Informationen zur räumlichen Verbreitung, Zusammensetzung und zu den Eigenschaften der potenziellen Endlagerwirtsgesteine
geomorphologische Untersuchungen zur Rekonstruktion und Prognose der Erosionsgeschwindigkeiten sowie der langfristigen Hebungs- bzw. Absenkungsprozesse (zwecks Bewertung der Gefahr des Freilegens des Endlagers)
Analyse der langfristigen klimatischen Entwicklung der vorgesehenen Endlagerregion sowie auf aktualistischen Prinzipien beruhende Langzeitklimaprognose (z. B. Gefahr von Vereisungen und eiszeitlichen Rinnenbildungen)

Die weitere Bewertung und Abgrenzung untersuchungswürdiger, potenziell für die HAW-Endlagerung geeigneter Standortregionen erfolgt im Rahmen der Standorterkundung. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Wirtsgesteine haben gesteinspezifische Auswahlkriterien, Erkundungsziele und Untersuchungsmethoden zur Folge (siehe Kap. 4.4).

4.3 Beispiele für Standortauswahlverfahren

Die international durchgeführten Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager sind auf einem sehr unterschiedlichen Entwicklungsstand und reichen von Konzeptstudien über laufende Auswahlverfahren bis hin zu bereits begonnenen Erkundungsbergwerken oder Untertagelaboren, die unter der Voraussetzung ihrer Eignung in Endlager überführt werden sollen. Am Beispiel mehrerer, weit fortgeschrittener Standortauswahlverfahren werden die länderspezifischen Vorgehensweisen, der zeitliche Ablauf, die Entscheidungsgrundlagen und der aktuelle Stand von Endlagersuchverfahren in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein zusammenfassend dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung der

Standortauswahlverfahren in den Ländern Schweden, Finnland, Schweiz, Frankreich, Deutschland und USA ist in [Hammer et al. 2009] enthalten.

4.3.1 Deutschland

In Deutschland hat man sich bereits Mitte der 1950er Jahre mit Überlegungen zur Entsorgung der aus der zivilen Kernenergienutzung entstehenden Abfälle beschäftigt. Dabei stützte man sich u. a. auf die in den USA diesbezüglich gemachten Erfahrungen, wo bereits 1955 an der National Academy of Science ein „Committee on waste disposal“ geschaffen wurde, das Salzformationen zur Lagerung von hochradioaktiven Abfällen vorschlug [Theis 1956].

1964 benannte die Bundesanstalt für Bodenforschung Salzstrukturen, die zur Aussohlung von Kavernen zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet erschienen [Richter-Bernburg & Hofrichter 1964]. Für die Auswahl der Salzvorkommen wurden die in Tabelle 4-7 genannten Kriterien genutzt.

Tabelle 4-7: Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten in deutschen Salzstrukturen [Richter-Bernburg & Hofrichter 1964]

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

Detaillierter bewertet wurden 7 Salzstrukturen, wobei neben sechs norddeutschen Salzstrukturen auch das flach lagernde Salzvorkommen Leutesheim (80 km SSW Karlsruhe) betrachtet wurde. Da zusätzliche geologische Untersuchungen im Rahmen dieser Studie nicht erfolgten, ist die vorgenommene Auswahl eher zufällig und nicht auf systematische Bewertungen aller im Untergrund Deutschlands vorkommenden Salzlagerstätten zurückzuführen. Unter den analysierten Salzstrukturen wurden Krummendeich und Bunde/Jemgum als besonders geeignet eingestuft.

In den 1970er Jahren wurden zwecks Auswahl eines Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle zuerst vom Bund und dann vom Land Niedersachsen Standortauswahlverfahren durchgeführt. Sowohl das Verfahren des Bundes als auch das vom Land Niedersachsen im Anschluss daran realisierte Verfahren, das 1977 zur Auswahl des Salzstocks Gorleben als Standort für die Errichtung eines Erkundungsbergwerkes für Untersuchungen zur Eignung dieser Salzstruktur zur Endlagerung radioaktiver Abfälle führte, verliefen nachvollziehbar und in mehreren, aufeinander aufbauenden Schritten. Die Auswahlverfahren basierten vor allem auf fachlichen (u. a. geologischen, hydrologischen, wirtschaftlichen, geotechnischen und raumordnerischen) Gründen und erfolgten unter Berücksichtigung von vorher festgelegten Auswahlkriterien.

Im Vergleich mit den Standortsuchverfahren in anderen Ländern weist das Auswahlverfahren in Deutschland die Besonderheit auf, dass die durch den Bund veranlasste Standortsuche für ein Endlager integraler Bestandteil der Suche nach einem geeigneten Standort für ein „Nukleares Entsorgungszentrum“ (NEZ) war. Im Gesamtkonzept der Suche nach einem NEZ-Standort stellte das Endlager nur eine zusätzliche Option dar. Der Schwerpunkt des Suchverfahrens lag eindeutig auf der Auswahl eines Standortes, der einen möglichst umweltschonenden Betrieb der geplanten übertägigen Wiederaufarbeitungs- und Konditionierungsanlage gewährleisten sollte. Folgerichtig waren auch die wichtigsten Kriterien für die Standortauswahl vor allem diesbezüglich ausgerichtet.

Im Verlaufe des Standortauswahlverfahrens des Bundes wurden unter Zugrundelegung der in Tabelle 4-8 erfassten Kriterien 26 mögliche Standorte, verteilt auf fast alle Bundesländer ermittelt.

Tabelle 4-8: Kriterien für die Auswahl eines Standortes für ein „Nukleares Entsorgungszentrum“ in Deutschland [KEWA 1974]

Ausschlusskriterien: Erdbebengebiete, Flugschneisen, Trinkwassereinzugsgebiete, Naturschutz-, Erholungs- und Fremdenverkehrsgebiete
Gebiete mit möglichst geringer Bevölkerungsdichte, wobei der Nahbereich bis 15 km Radius völlig siedlungsfrei sein sollte
günstige meteorologische Verhältnisse (Windrichtungsverteilung, Hauptwindrichtung und Häufigkeit ungünstiger meteorologischer Ausbreitungsbedingungen)
Wirtschaftsfaktoren (günstige Infrastruktur, Umfang der Milch- bzw. Viehwirtschaft, Energie- und Wasserversorgung, günstige Verkehrsanbindung)
geologische Kriterien, wie Möglichkeit zur Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle, Baugrundbeschaffenheit, Vorhandensein von Stauhorizonten als natürliche Sicherheitsbarrieren gegen Boden- und Grundwasserkontamination im Störfall, Lage der Grundwasseroberfläche, Grundwasserfließrichtung sowie -ergiebigkeit
allgemeine Kriterien (Entfernung zur nächsten Staatsgrenze und zur nächsten kerntechnischen Anlage, erforderliche Umsiedlungsmaßnahmen im vorgesehenen Standortgelände)

Auf der Grundlage von im Vergleich zur ersten Auswahlphase leicht modifizierten, entsprechend ihrer Bedeutung gewichteten Bewertungskriterien wurde die Anzahl der Standorte

schrittweise weiter eingegrenzt (siehe [Hammer et al. 2009]). Die verbliebenen acht Standorte wurden in einem Gutachten von [Lüttig & Wagner 1974] bezüglich ihrer hydrogeologischen und geologischen Rahmenbedingungen vergleichend bewertet.

Im Ergebnis der Anwendung zahlreicher Bewertungskriterien wurde eine Reihung der Standorte vorgenommen (1 – Ahlden, Salzstock Lichtenhorst, an der Aller; 2 – Börger, Salzstock Wahn, Emsland; 3 – Faßberg, Salzstock Weesen-Lutterloh, Lüneburger Heide). Unter Zugrundelegung dieser Standortreihung stellte das BMFT 1975 acht Mio. Mark, verteilt auf drei Jahre, für detaillierte Untersuchungen der Salzstöcke Wahn, Lichtenhorst und Lutterloh zur Verfügung. Aufgrund von Bevölkerungsprotesten wurden die Arbeiten auf Weisung des BMFT am 10.08.76 endgültig abgebrochen. Damit endete das Standortauswahlverfahren des Bundes.

Der Standort Gorleben wurde im Auswahlverfahren des Bundes für ein NEZ nicht berücksichtigt. Dies hatte ausschließlich raumordnerische Gründe, wie ein Auszug der Anlage 1 des KEWA-Berichtes [KEWA 1974], der den Landkreis Lüchow-Dannenberg in einer Vergrößerung zeigt (Abbildung 4-1), belegt. Der Landkreis Lüchow-Dannenberg war großflächig von bestehenden Naturparks, Kurz- und Ferienerholungsgebieten überdeckt. Damit schied aufgrund von raumordnerischen Gesichtspunkten der Landkreis und damit der Salzstock Gorleben frühzeitig im Auswahlverfahren aus und wurde in dem eigentlichen Auswahlverfahren nicht weiter berücksichtigt. Da die Ergebnisse der KEWA-Studie [KEWA 1974] die Grundlage für die Beauftragungen der Gutachten von Lüttig & Wagner [Lüttig & Wagner 1974] und KBB [KBB 1974] darstellten, ist der Standort Gorleben auch in diesen Arbeiten nie detailliert analysiert worden.

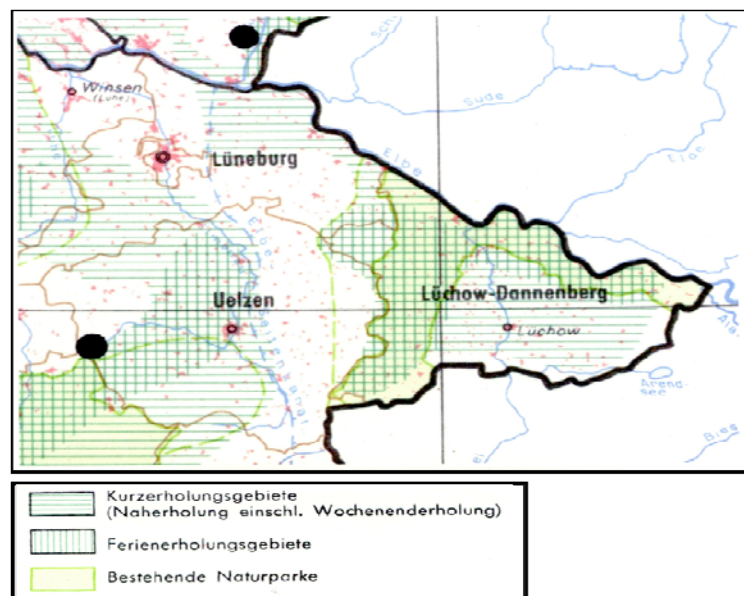


Abbildung 4-1: Verteilung der Naturparks, Kurzerholungs- und Feriengebiete im Bereich des Landkreises Lüchow-Dannenberg als Grund für die Nichtberücksichtigung des Standortes Gorleben im KEWA-Auswahlverfahren des Bundes [KEWA 1974]

Im Anschluss an das Auswahlverfahren des Bundes führte Niedersachsen, das ein großes Interesse an einer solchen Industrieansiedlung hatte, 1976/77 ein Standortauswahlverfahren für ein NEZ auf seinem Gebiet durch. Es berücksichtigte die Ergebnisse des Standortsuchprogramms des Bundes, wich aber durch Änderungen in der Bewertung einzelner Auswahlkriterien teilweise davon ab. Im Unterschied zum Vorgehen des Bundes stellte in Niedersachsen das Endlager im tiefen geologischen Untergrund schon zu Beginn des Auswahlverfahrens eine sehr wesentliche Komponente des Entsorgungszentrums dar.

Im März 1976 wurde von der Landesregierung für die Standortauswahl eine interministerielle Projektgruppe benannt, deren streng vertrauliche Aufgabe es war, Kriterien und Grundlagen für eine Standortauswahl zu erarbeiten. Beteiligt waren neben dem Wirtschaftsressort die Staatskanzlei, das Sozial-, das Innen- und das Landwirtschaftsministerium Niedersachsens. Je nach Bedarf wurden Fachleute aus dem Landesamt für Bodenforschung und aus dem zuständigen Oberbergamt sowie aus dem „Energiebeirat“ unter Leitung von Carl-Friedrich von Weizsäcker herangezogen.

Das niedersächsische Auswahlverfahren gliederte sich in 4 Phasen. Unter Zugrundelegung der in Tabelle 4-9 erfassten Ausschlusskriterien wurden von 140 Salzstöcken erst 23, dann 13 Standorte ausgewählt. Diese wurden in der dritten Phase anhand von Kriterien aus einer raumordnerischen Empfehlung der Innenministerkonferenz zur Standortauswahl bei Energieanlagen und anhand von Bewertungsrichtlinien des Bundesinnenministeriums für KKW-Standorte und Kernenergieanlagen weiter bewertet.

Tabelle 4-9: Ausschlusskriterien, die im Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen für ein „Nukleares Entsorgungszentrum“ angewendet wurden

Lage des 3 x 4 km ² großen Standortgeländes im Vergleich zu den Salzstockumrissen
Größe des Salzstockes (je größer, desto besser)
Tiefe des Salzstockes (nicht tiefer als 800 m unterhalb der Geländeoberfläche)
Bevölkerungsdichte im in Frage kommenden Gebiet des Salzstockes
Bestehen konkurrierender Nutzungsansprüche (Gerichtsbarkeit/Zuständigkeit, Berechtigungsansprüche und Nutzungsrechte)

In Phase 4 des niedersächsischen Auswahlverfahrens wurden die verbliebenen Standorte Wahn, Lichtenhorst, Gorleben und Mariagluck (Salzstock Höfer) in der Arbeitsgruppe einer zusätzlichen Prüfung unterzogen. Dabei wiesen drei der Standorte mindestens ein Kriterium auf, das sie als möglichen Standort disqualifizierte. Der Standort am Salzstock Wahn wurde aussortiert, da er sich teilweise unter einem Truppenübungsplatz der Bundeswehr befindet. Der Standort Lichtenhorst liegt in einem Grundwasservorranggebiet von Hannover. Der Standort Höfer entspricht aufgrund seiner geringen Größe und seiner geringen Tiefenlage sowie infolge seiner bisherigen wirtschaftlichen Nutzung als Gewinnungsbergwerk nicht den Auswahlkriterien.

Da derartige konkurrierende Nutzungsansprüche am Standort Gorleben fehlten (es wurde nur von geringen Kalisalzvorräten ausgegangen, siehe [Jaritz 1981]) und der Salzstock auf-

grund seiner Größe (40 km²), den prognostizierten mächtigen Steinsalzpartien im Kernbereich der Salzstruktur, seiner Tiefenlage (Salz in der Tiefe von 300 bis 3300 m) und seiner Unverritztheit geeignet war, wurde er vom Land Niedersachsen als möglicher Endlagerstandort vorgeschlagen.

Aufgrund der Vertraulichkeit der Arbeit der niedersächsischen interministeriellen Projektgruppe sind die Ergebnisse der einzelnen Phasen bzw. der Weg der Entscheidungsfindung nicht öffentlich zugänglich. Dies lässt aus heutiger Sicht und unter Zugrundelegung von mehr als 30 Jahren Erfahrung in internationalen Endlagerprojekten viel Platz für Spekulationen, Misstrauen und Kritik an dem Verfahren, den Bewertungsgrundlagen und an der Standortentscheidung selbst. Die heute geforderte Transparenz des Standortauswahlverfahrens war Mitte der 1970er Jahre nicht Stand von Wissenschaft und Technik. Trotz dieser Einschränkung war das in den 1970er Jahren in Deutschland durchgeführte Auswahlverfahren für einen HAW-Endlagerstandort seiner Zeit weit voraus.

Im Juli 1977 akzeptierte der Bund die niedersächsische Standortentscheidung und beauftragte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) damit, die Voraussetzungen für die Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens für dieses Vorhaben zu schaffen. Seit 1979 wird in aufwändigen übertägigen (1979 bis 1984) und untertägigen geologisch-geophysikalischen sowie ingenieurgeologisch-hydrogeologischen Erkundungsarbeiten die Eignung des Salzstocks für den Bau eines Endlagers untersucht. Diese Arbeiten wurden im Oktober 2000 aufgrund einer politischen Vereinbarung zwischen den KKW-betreibenden Energieversorgungsunternehmen (EVU) und der Bundesregierung unterbrochen und infolge dessen noch nicht abgeschlossen. Bis dato wurden keine Befunde festgestellt, die die Eignung der Salzstruktur für die Endlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle in Frage stellen [Bornemann et al. 2008]. Eine abschließende Eignungsbewertung steht für den Salzstock Gorleben noch aus.

4.3.2 Frankreich

In Frankreich werden seit Anfang der 1960er Jahre durch die ANDRA Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen durchgeführt [CNE 1995]. In den 1970er Jahren erfolgten erste Bewertungen der in Frankreich existierenden Ton-, Schiefer-, Salz- und Granitvorkommen bezüglich ihrer Eignung als Endlagerstandorte. Salz wurde als Endlagerwirtsgestein nicht weiter verfolgt, da es sich bei den wenigen Salzlagerstätten Frankreichs überwiegend um flach lagernde Salzvorkommen handelt, die entweder nicht den geforderten Kriterien entsprechen oder die heute bzw. in Zukunft wirtschaftlich genutzt werden. Kristallgebiete wurden zwar mehrfach in das Auswahlverfahren einbezogen, letztendlich konnte aber ein Langzeitsicherheitsnachweis für die ausgewiesenen Gebiete nicht erfolgreich geführt werden [ANDRA 2005c]. Seitdem beschränken sich die Arbeiten im Kristallin auf die Zusammenarbeit mit SKB, Schweden.

In den französischen Auswahlverfahren, die vor 1990 durchgeführt wurden, konnte aufgrund von Bevölkerungsprotesten kein Standort festgelegt werden. Nach der Verabschiedung des „Gesetzes über die Behandlung radioaktiver Abfälle“ am 30.12.1991 wurde 1992 ein neues

Standortsuchverfahren begonnen. In der ersten Phase dieses Auswahlverfahrens wurden im Konsens mit den Departements mögliche Standortregionen auf Freiwilligkeitsbasis gesucht. Aufgrund eines politisch unterstützten Mediationsverfahrens haben 30 Departements potenziell geeignete Bereiche ausgewiesen und sich um die Durchführung von detaillierten Untersuchungen auf ihrem Gebiet beworben. 1994 wurden anhand der bereits vorliegenden Daten, d. h. ohne spezielle Standortuntersuchungen, vier potenzielle Standortgebiete ausgewählt, in denen zwischen 1994 und 1996 umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt wurden (ausführlicher siehe [Hammer et al. 2009]).

Nach Auswertung der geowissenschaftlichen Untersuchungen, der vorläufigen Endlagerkonzepte und erster Sicherheitsanalysen fiel im Dezember 1998 die politische Entscheidung für die jurassischen Tongesteine am östlichen Rand des Pariser Beckens (Standortregion Meuse/Haute Marne; [ANDRA 2001], [ANDRA 2006]). Zur untertägigen Erkundung der Wirtsgesteinseigenschaften und zur Optimierung bzw. Erprobung des Endlagerkonzeptes wurde nahe dem Dorf Bure das Untertagelabor Meuse/Haute Marne errichtet.

Die erste Untersuchungsphase wurde 2005 mit der Erstellung des „Dossiers 2005“ [ANDRA 2005d] abgeschlossen. Auf der Basis dieser Machbarkeitsstudie ermächtigte die französische Regierung die ANDRA im Jahr 2006, die Arbeiten am Standort Meuse/Haute Marne fortzusetzen. In den Jahren 2007 bis 2015 sind schwerpunktmäßig weitere Labor- und In-situ-Studien sowie geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten zur Charakterisierung der Tonsteine, zur Festlegung des endgültigen Standortes im Untersuchungsgebiet und zur Untersuchung der im Endlager ablaufenden THMC-Prozesse vorgesehen. Auf der Grundlage dieser Daten soll unter Beteiligung der Öffentlichkeit 2016 der Bau eines Endlagers für Wiederaufarbeitungsabfälle vom französischen Parlament beschlossen werden. Der Betriebsbeginn soll 2025 sein.

4.3.3 Schweiz

In der Schweiz wurden ab Mitte der 1970er Jahre nationale Konzepte zur Entsorgung radioaktiver Abfälle erarbeitet. Die Arbeiten konzentrierten sich zunächst auf das kristalline Grundgebirge.

Im Rahmen des Projektes „Gewähr“ [NAGRA 1985] und der „Kristallin-I-Studie“ [NAGRA 1994a] wurden der generelle Sicherheitsnachweis und der bautechnische Machbarkeitsnachweis für die Endlagerung von hoch- und mittelradioaktiven Abfällen am Beispiel eines Modellstandortes im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz erbracht. Die Arbeiten beinhalteten aber keinen Standortnachweis, da das Kristallin der Nordschweiz in seiner lithologisch-petrographischen Zusammensetzung, im strukturell-tektonischen Aufbau sowie in der Wasserführung als äußerst heterogenes Gestein eingeschätzt wurde. Außerdem existieren Nutzungskonflikte mit Thermalwasserbohrungen.

Ergänzend zu übertägigen geologischen Erkundungsarbeiten (siehe [NAGRA 2005]) wurden seit 1983 im Felslabor Grimsel zahlreiche In-situ-Experimente zur Untersuchung der Barriereigenschaften kristalliner Gesteine durchgeführt (z. B. [NAGRA 1999], [NAGRA 2001]).

Außerdem beteiligte sich die Schweiz an Experimenten in anderen, im Kristallin positionierten URLs, vor allem in Schweden (Äspö und Stripa), und führt einen intensiven Erfahrungsaustausch mit Ländern durch, die ebenfalls Endlagerprojekte im Kristallin verfolgen (z. B. Finnland, Schweden, Kanada).

Im Rahmen des durch einen Bundesratsbeschluss ergänzend zu den Kristallinstudien initiierten Sediment-Untersuchungsprogramms (1988 bis 2000) erfolgte ein Evaluierungsverfahren für das gesamte Gebiet der Schweiz zwecks Auswahl möglicher Tonsteinformationen und Standortgebiete [NAGRA 1991], [NAGRA 1994b]. Nach Auswertung der vorliegenden geowissenschaftlichen Daten zur regionalen Verbreitung und Ausbildung der Tonsteine fokussierten sich die Untersuchungen auf die tonreichen Gesteinsformationen Opalinuston und Untere Süßwassermolasse (Abbildung 4-2).

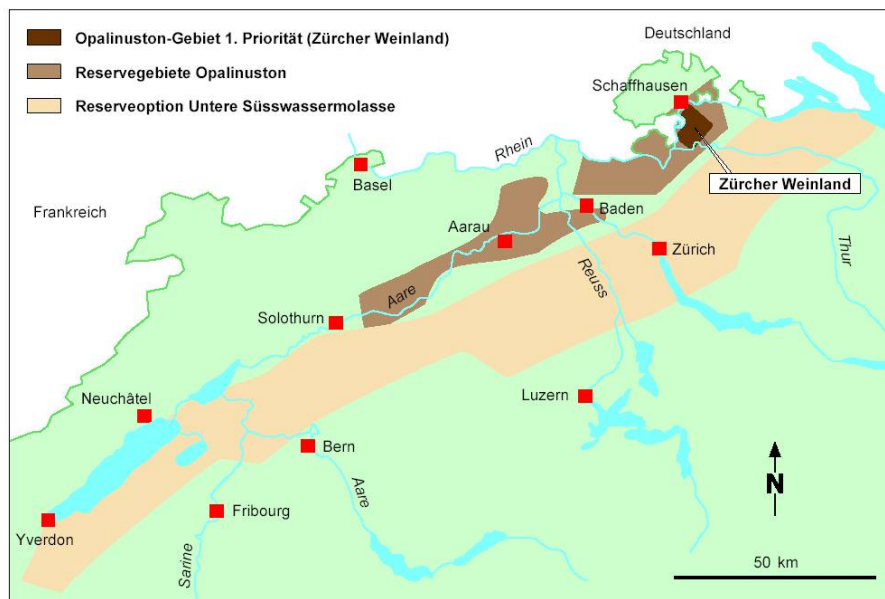


Abbildung 4-2: Verbreitung des Opalinustons und der Unteren Süßwassermolasse in der Schweiz [NAGRA 2002c]

Nach der grundsätzlichen Entscheidung für den Opalinuston im Jahre 1994 erfolgten bis Ende 1995 Auswertungen der bereits vorhandenen geologischen Erkundungsergebnisse zur tektonischen Gliederung des Opalinustons und zu den stofflich-strukturellen Besonderheiten des potenziellen Wirtsgesteins.

Die Ergebnisse der ab 1998 im Zürcher Weinland realisierten übertägigen Erkundungsarbeiten sind Grundlage der Machbarkeitsstudie bzw. des vorläufigen Sicherheits- bzw. Entsorgungsnachweises [NAGRA 2002b]. Der Entsorgungsnachweis beinhaltet allerdings keine Standortauswahl, sondern belegt lediglich die grundsätzliche Machbarkeit der Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle im Opalinuston des Zürcher Weinlandes. Weitere Untersuchungen der Barriereigenschaften der tonigen Wirtsgesteine wurden im Rahmen internationaler Forschungsprogramme im Felslabor Mont Terri sowie im französischen URL Meuse/Haute Marne durchgeführt.

Das weitere Vorgehen in der Schweiz bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle wurde im Kernenergiegesetz [KEG 2003] und in der Kernenergieverordnung [KEV 2004] neu geregelt, die beide am 1. Februar 2005 in Kraft getreten sind. Darin ist vorgeschrieben, dass Ziele und Vorgaben für die Lagerung sowie das Standortauswahlverfahren in einem Sachplan zu regeln sind [BFE 2008].

Trotz des positiven Votums für die Standortregion „Zürcher Weinland“ und den Opalinuston wurde im „Sachplan geologische Tiefenlager“ ein neues dreistufiges Auswahlverfahren zur Findung von Endlagerstandorten in der Schweiz festgelegt [HSK 2007], [BFE 2008]. Auf der Grundlage des „Sachplanes geologische Tiefenlager“ soll ein neues, breit akzeptiertes Standortauswahlverfahren für das gesamte Gebiet der Schweiz unter Leitung des Bundesamtes für Energie (BFE) sowie bei Beteiligung der Kantone und der Öffentlichkeit durchgeführt werden.

Die Anwendung des „Sachplanes geologisches Tiefenlager“ sieht zur Erreichung der Ziele der ersten Etappe ein 5-stufiges Einengungsverfahren vor, das ausführlich in [NAGRA 2008a]-c] beschrieben ist. In der aktuellen Planung ist die Inbetriebnahme eines Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle ab 2030 und für hochaktive Abfälle ab 2040 vorgesehen.

4.3.4 Schweden

In Schweden werden, ebenso wie in Finnland, aufgrund der geologischen Gegebenheiten nur Gesteine des kristallinen Grundgebirges als Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. Aufgrund der lang anhaltenden Hebungsbewegungen des Baltischen Schildes sind in diesen Ländern keine für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente oder hochradioaktiver Abfälle geeigneten Salz- oder Tonsteinvorkommen vorhanden (Abbildung 4-3).

Bereits Mitte der 1970er Jahre wurden in Schweden durch SKB erste Arbeiten zur Standortauswahl für ein Endlager für radioaktive Abfälle durchgeführt. Zum Test des Endlagerkonzepts im Kristallin, vor allem zur Entwicklung der Einlagerungstechnik, zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Endlagerbehälter und backfill-Material sowie zum Studium von Störungszonen und der Grundwasserfließverhältnisse im geklüfteten Kristallin wurde von SKB ab 1976 bis 1992 das Untertagelabor „Stripa“ in einem alten Eisenerzbergwerk im Kristallin (ca. 230 km W Stockholm) genutzt.

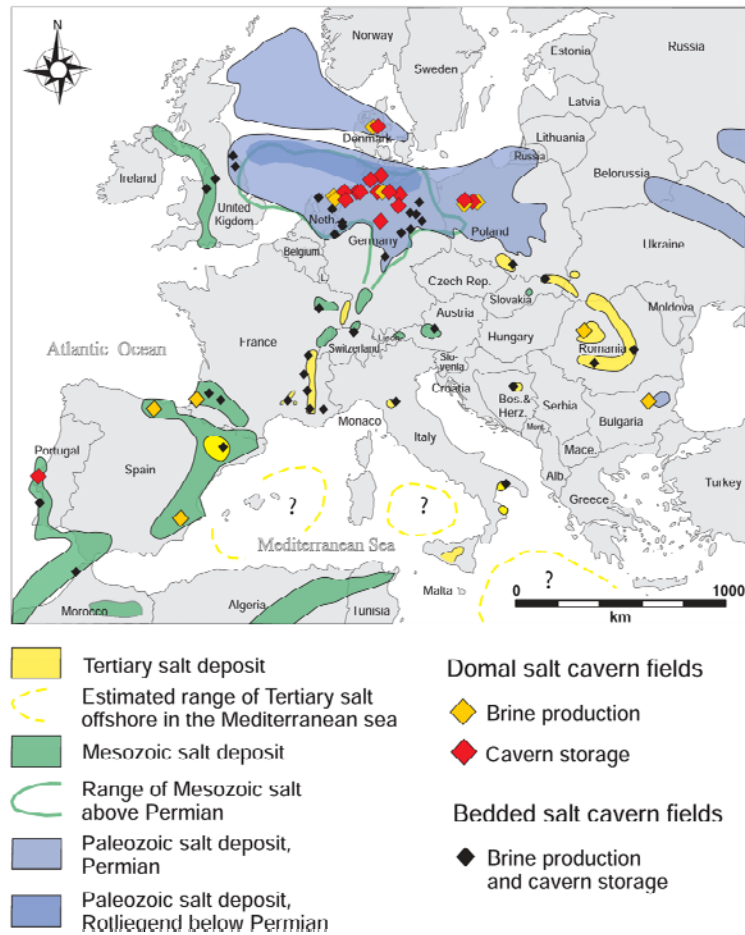


Abbildung 4-3: Verteilung der Salzlagerstätten in Europa [KBB 2007]. Deutlich zu sehen ist das Fehlen von Salzvorkommen in Skandinavien.

Parallel dazu erfolgte ein mehrstufiges Auswahlverfahren, in dem zunächst durch Auswertung bereits vorhandener Daten geeignete Gebiete ausgewiesen wurden. Da große Teile der kristallinen Gesteine Schwedens für die Endlagerung prinzipiell geeignet schienen, wurden an 10 Orten erste Standortuntersuchungen mit Tiefbohrungen durchgeführt. Parallel zu den Standorterkundungsarbeiten wurde am Standort Äspö ein URL eingerichtet, um die Kenntnisse über kristalline Wirtsgesteine zu erweitern und das Endlagerkonzept zu testen.

An die übersichtsmäßigen Untersuchungen zur Standortauswahl der 1980er Jahre schlossen sich „Allgemeine Studien zur Standortauswahl“ (general siting studies) unter besonderer Berücksichtigung von Gebieten mit bereits vorhandenen nuklearen Einrichtungen an. Aufgrund von Machbarkeitsstudien (feasibility studies; 1993 bis 2000) wurden in einer ersten Phase für zehn Gebiete unter Beteiligung der betroffenen Gemeinden Eignungsbewertungen durchgeführt. In mehreren Schritten wurden unter Zugrundelegung von Standortkriterien und langzeitsicherheitlichen Bewertungen der Erkundungsdaten sowie der negativen öffentlichen Akzeptanz an einigen Standorten letztendlich 3 Regionen (Uppsala: Forsmark-Östhammar, Hargshamn, Tiep; Södermanlands: Nyköping; Kalmar: Oskarshamn, Hultsfred) ausgewählt, die im Zeitraum 1997 bis 2001 erneut einer Machbarkeitsstudie unterzogen wurden (Abbildung 4-4). SKB führte ab 2002 an den Standorten Oskarshamn und Forsmark detaillierte geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten zur Standortcharakterisierung durch.

Nach Vorlage eines Sicherheitsberichtes Anfang 2009 für beide Standorte wurde von SKB aufgrund einer Langzeitsicherheitsanalyse der Standort Forsmark (bei Östhammar) für den Endlagerbau ausgewählt. Die Inbetriebnahme des Endlagers ist für 2023 vorgesehen.

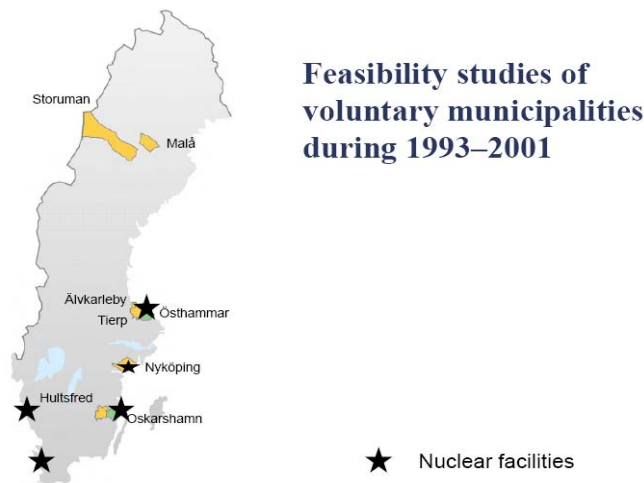


Abbildung 4-4: Vorausgewählte Regionen für die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in Schweden

4.3.5 Finnland

Finnland beschäftigt sich seit 1977 mit wissenschaftlichen Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, speziell in hochmetamorphen bzw. magmatischen Gesteinen. Von 1980 bis 1982 erfolgte eine generelle Bewertung der Endlagerungsoptionen im finnischen Grundgebirge (siehe [Hammer et al. 2009]).

Nach dem Regierungsbeschluss zur Errichtung eines Endlagers in kristallinen Gesteinen in mehreren hundert Meter Tiefe im Jahr 1983 erfolgte im Zeitraum von 1983 bis 1986 ein „Areal Screening“ (Übersichtsstudie) potenziell geeigneter Gebiete auf der Grundlage struktur- und hydrogeologischer Informationen. Dabei wurde für das ungeklüftete kristalline Basement eine positive Sicherheitsbewertung durchgeführt [TVO 1985]. Eine schrittweise Reduzierung der Anzahl der Standortalternativen erfolgte v. a. auf der Grundlage geowissenschaftlicher und soziopolitischer Faktoren, wie Bevölkerungsdichte und Infrastruktur, Bodenbesitzverhältnisse und öffentliche Akzeptanz.

1987 wurden fünf potenziell geeignete Gebiete für weitergehende Untersuchungen festgelegt (Abbildung 4-5), an denen von 1987 bis 1992 geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten mit Tiefbohrungen von bis zu 1000 m Tiefe sowie Machbarkeitsstudien durchgeführt wurden.



Abbildung 4-5: Lage der fünf detailliert untersuchten Standorte für den Bau eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in Finnland

Als Ergebnis der Standortuntersuchungen und vorläufiger Sicherheitsbewertungen (Machbarkeitsstudien) erfolgten von 1993 bis 1999 vertiefende Untersuchungen an den drei verbliebenen Standorten Romuvaara, Kivetty und Olkiluoto sowie am Standort Loviisa (zusätzlicher Standort, wegen Nähe zum KKW), mit dem Ergebnis einer positiven Bewertung aller vier Standorte [Vieno & Nordman 1999]. Aufgrund der besten Infrastruktur und der Nähe zum KKW wurde letztendlich Olkiluoto (trotz komplizierten strukturgeologischen Aufbaus) am günstigsten bewertet und 1999 als möglicher Endlagerstandort vorgeschlagen. Nach Zustimmung der lokalen Politik und Bevölkerung (60 % Zustimmung) sowie der Genehmigungsbehörde Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) wurde 2001 dieser Standort für die Errichtung einer „Underground rock characterisation facility“ durch das finnische Parlament bestätigt. Seit 2004 erfolgt am Standort Olkiluoto die Auffahrung des URLs bzw. Erkundungsbergwerkes ONKALO. Die Vortriebsarbeiten und die Installation der notwendigen Technik sollen bis Ende 2010 abgeschlossen sein.

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

4.3.6 USA

In den USA wurden zwei voneinander unabhängige Standortsuchverfahren durchgeführt. Die US Atomic Energy Commission (AEC), der Vorgänger des US Department of Energy (DoE),

hat bereits 1955 die National Academy of Sciences (NAS) beauftragt, zu prüfen, welche Gesteine sich zur Endlagerung von radioaktiven Stoffen aus der militärischen Nutzung der Kernenergie eignen. Die NAS empfahl die Endlagerung in Salzformationen, woraufhin schon 1957 ein landesweites „screening“ zur Auffindung von potenziell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeigneten Steinsalzlagerstätten durchgeführt wurde. Nach Untersuchungen des US Geological Survey (USGS) wurden in vier Regionen Salzlagerstätten benannt [Pierce & Rich 1962]. Die flach lagernden, etwa 250 Mio. Jahre alten, permischen Salzlagerstätten im Delaware-Becken im Südost-Teil New Mexicos und große Gebiete in Kansas, Oklahoma und West-Texas erhielten die beste Bewertung.

Nach dem politischen Scheitern und Sicherheitsbedenken für ein Endlager in einem stillgelegten Salzbergwerk und detaillierten Untersuchungen von vier Standorten in New Mexico durch den USGS legte das DoE 1974 die in der Chihuahua-Wüste gelegene Salzformation im Südosten von New Mexico, ca. 40 km östlich von Carlsbad, als Standort für das Endlager (Waste Isolation Plant, „WIPP“) fest. Die Gründe für diese Standortauswahl wurden aufgrund des militärischen Charakters der Anlage nicht publiziert und nicht öffentlich diskutiert. Es gab allerdings auch in dieser frühen Phase der Standortsuche Auswahlkriterien für potenziell geeignete Salzvorkommen [Rempe 2008].

Die Erkundungsarbeiten zur Standortcharakterisierung begannen 1975. 1979 wurde die Betriebsgenehmigung zur In-situ-Erforschung der Wirtsgesteinseigenschaften und zur Entwicklung von Einlagerungsmethoden an der WIPP-Site erteilt. Zwei Jahre später wurde als Vorstufe zum WIPP-Bau mit der Errichtung des URLs, d. h. mit dem Abteufen der Schächte begonnen. Die Genehmigung und Inbetriebnahme des WIPP verzögerten sich mehrfach durch zusätzlich zu berücksichtigende Sicherheitskriterien und Gesetzesänderungen sowie Wechsel der Zuständigkeiten bzw. Genehmigungsbehörden. Knapp 30 Jahre nach dem Beginn des Standortauswahlverfahrens fand am 26.03.1999 die Eröffnung der WIPP und die Einlagerung des ersten Abfalls aus den Los Alamos National Laboratories statt.

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

Parallel zu diesen Arbeiten wurde Mitte der 1970er Jahre ein Standortsuchverfahren für hochradioaktive Abfälle aus der zivilen Nutzung der Kernkraft gestartet. Das 1977 begonnene „site screening“ erfolgte mit der Zielvorgabe, potenziell geeignete Regionen in Bundesstaaten, in denen bereits mit radioaktivem Material gearbeitet wurde, auszuweisen [Macfarlane & Ewing 2006]. 1978/1979 wurden das Hanford Gebiet, Washington, und das Nevada Kernwaffentestgelände, das 1975 durch den Bundesstaat Nevada selbst als Endlagerstandort vorgeschlagen wurde, als potenziell geeignete Standortregionen empfohlen.

Aufgrund breiter Kritik am Auswahlverfahren und der mangelnden Transparenz des Auswahlprozesses wurde 1982 das DoE beauftragt, allgemeine Richtlinien für die Standortwahl zu entwickeln und auf dieser Basis drei Gebiete für Standortuntersuchungen auszuwählen. Im Ergebnis eines gesetzlich vorgeschriebenen schrittweisen Auswahlverfahrens (Nuclear Waste Policy Act, NWPA) wurden aus neun Standorten in den Wirtsgesteinen Salz und Tuff aufgrund von Übersichtsstudien und bereits vorhandenen Datensammlungen 1985 fünf Standorte als geeignet bewertet. Drei dieser Standorte (Hanford in Washington, Deaf Smith County in Texas und Yucca Mountain in Nevada) wurden für eingehende wissenschaftliche Standortuntersuchungen vorgeschlagen. Die Standorterkundungen wurden jedoch 1987 per Gesetzesänderung auf einen Standort beschränkt. Durch die Bundesregierung wurde der Standort Yucca Mountain ausgewählt, der ca. 100 Meilen NW von Las Vegas an der westlichen Grenze der Nevada Test Site liegt und aus dem Wirtsgestein Tuff aufgebaut ist (Abbildung 4-6).

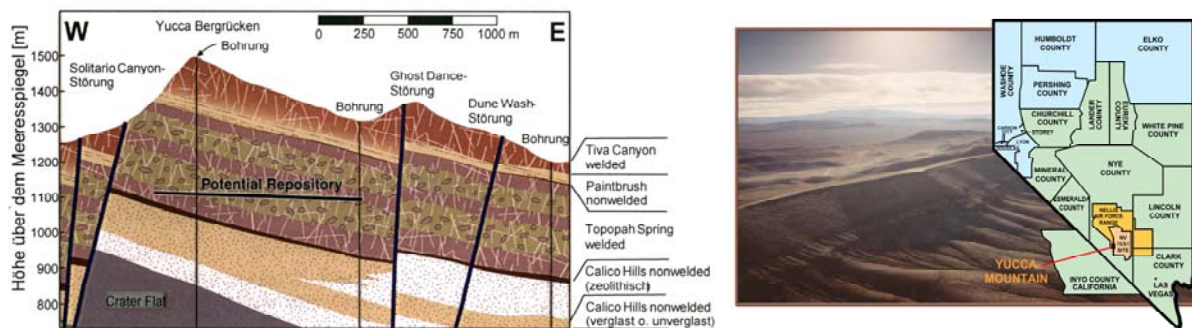


Abbildung 4-6: Schematischer geologischer Schnitt und Lage des Endlagerstandortes Yucca Mountain mit den wichtigsten hydrogeologischen Einheiten (Quelle EPA)

Die wesentlichsten Argumente für den Standort Yucca Mountain waren die geringe Jahresniederschlagsmenge (ca. 20 mm, wovon 95 % an der Erdoberfläche abfließen oder verdunsten) und der sehr tiefe Grundwasserspiegel ca. 300 m unterhalb der Erdoberfläche sowie die geschlossene Beckenstruktur, d. h. das geplante Endlager hat keinen Einfluss auf Grundwassereinzugsgebiete benachbarter Regionen. Weitere wichtige Gründe für die Auswahl von Yucca Mountain waren Besitz und Vornutzung des Geländes (Nevada Test Site) durch den Staat sowie die schwache politische Position des Bundesstaates Nevada.

Nach der konzeptionellen Planung eines URL am Standort Yucca Mountain (1987 bis 1994), wurde von 1994 bis 1997 das URL mit dem Ziel errichtet, strukturgeologische Kartierungen und detaillierte Untersuchungen der hydrogeologischen, mineralogisch-geochemischen und thermo-mechanischen Eigenschaften der aufgeschlossenen stratigraphischen Einheiten durchzuführen. 1998 wurde der US-Regierung eine Studie über die Realisierbarkeit eines Endlagers am Standort Yucca Mountain vorgelegt, die durch IAEA und OECD begutachtet wurde. Anfang 2002 leitete der Senat unter Zugrundelegung der vom DoE aufgestellten Auswahl- und Sicherheitskriterien sowie der zum Standort Yucca Mountain vorliegenden geologischen Erkundungsergebnisse und Langzeitsicherheitsanalysen das Genehmigungsverfahren für den Bau eines Endlagers am Standort Yucca Mountain ein. Im Juli 2002 folgten

die Zustimmungen des Präsidenten und des Kongresses zum Endlagerbau, wobei 2004 allerdings die gerichtliche Auflage erteilt wurde, den Sicherheitsnachweis statt für 10000 Jahre für 1 Mio. Jahre zu führen. Nach entsprechenden Änderungen der Lizenzierungsunterlagen beantragte das DoE am 03.06.2008 bei der Genehmigungsbehörde (NRC) offiziell den Bau des Endlagers.

Die weitere Planung sah eine Baugenehmigung bis ca. Ende 2011, die Inbetriebnahme des Endlagers ca. 2017 und die Einlagerung des Abfalls ab 2021 vor. Unter der aktuellen US-Regierung wurde das Projekt im Frühjahr 2009 allerdings gestoppt. Am 05.03.2009 erfolgte anlässlich einer Senatsanhörung die Mitteilung durch das US-Energieministerium, dass der Standort Yucca Mountain zukünftig keine Option mehr für ein HAW-Endlager darstellt.

4.4 Standorterkundung

Durch die Standorterkundung müssen die Daten produziert werden, die für die Durchführung der standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse (inklusive Prognose der langzeitlichen geologischen Entwicklung), für die Planung des Endlagerbergwerkes sowie die Anpassung des Endlager- und Sicherheitskonzeptes an die tatsächlichen geologischen Standortgegebenheiten erforderlich sind. Die Ergebnisse der Standorterkundung bilden die Grundlage für das zur Genehmigung des Endlagers durchzuführende Planfeststellungsverfahren und für die im Langzeitsicherheitsnachweis erforderlichen Szenarienbewertungen sowie für die Planung eines sicheren Betriebs eines Endlagerbergwerkes und der abschließenden Verfüll- und Verschlussmaßnahmen.

Trotz internationaler Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung gibt es in Anbetracht der standort- und wirtsgesteinsspezifischen Besonderheiten keine weltweit abgestimmten Vorschriften bzw. Handlungsempfehlungen für die Erkundung von HAW-Endlagerstandorten. Art und Umfang der Standorterkundung werden vom Wirtsgesteinstyp und den darauf basierenden wirtsgesteinsabhängigen Erkundungszielen, vom Endlagerkonzept, von den für die Langzeitsicherheitsanalyse erforderlichen Daten sowie vom bereits erreichten Kenntnisstand zur Standortgeologie und zu den Barriereigenschaften der Wirtsgesteine und des Deck- bzw. Nebengebirges bestimmt.

Die Standorterkundung gliedert sich in drei Phasen. Die erste Phase besteht, aufbauend auf den bereits im Verlaufe der Standortvorauswahl durchgeführten Untersuchungen (Kap. 4.2), aus der Auswertung aller verfügbaren Altdaten (z. B. geologische Kartierungsergebnisse, Bohrungen, Resultate regionaler geophysikalischer Studien und Fernerkundungsdaten), um Art und Umfang der erforderlichen Erkundungsarbeiten festzulegen. Danach erfolgt in einer zweiten Phase die übertägige und in einer dritten Phase die untertägige Standorterkundung.

Wesentlichen Einfluss auf die Vorgehensweise bei der über- und untertägigen Standorterkundung sowie die eingesetzten Untersuchungsverfahren hat der Wirtsgesteinstyp. Die unterschiedlichen mineralogisch-geochemischen und petrophysikalischen Barriereigenschaften der Gesteine bestimmen die gesteinspezifischen Erkundungsziele. So bestimmt z. B. die Temperatur- bzw. Wärmeleitfähigkeit der Gesteine sowie die Menge und Wärme-

leistung der radioaktiven Abfälle entscheidend die durch die geologische Erkundung nachzuweisende Mindesteinlagerungsfläche. Daraus und aus den Eigenschaften der Wirtsgesteine ergeben sich die bei der Erkundung einzusetzenden geologisch-geophysikalischen Untersuchungsverfahren.

Parallel dazu werden In-situ- und Laboruntersuchungen zur Bestimmung von Gesteinskenn-
daten durchgeführt, die durch begleitende Modellberechnungen ergänzt werden, um das
Prozessverständnis für die in einem Endlager ablaufenden Prozesse zu verbessern.

4.4.1 Übertägige Standorterkundung – Ziele und wirtsgesteinsunabhängige Erkundungsmethoden

Die übertägige Standorterkundung erfolgt mit dem Ziel, standortspezifische Daten über die Verbreitung und die Lagerungsverhältnisse der potenziellen Endlagerwirtsgesteine und des Deck- bzw. Nebengebirges sowie erste Informationen zur Gesteinszusammensetzung und zu den struktur- bzw. hydrogeologischen, geochemischen und geomechanischen Gebirgseigenschaften zu erfassen. Die Daten der übertägigen Standorterkundung stellen die Basis für die Erarbeitung erster, in der Regel noch allgemeiner Modellvorstellungen über den geologischen Bau des Wirtsgesteins dar. Darüber hinaus liefern sie wichtige Erkenntnisse für den vorläufigen Langzeitsicherheitsnachweis sowie für das Endlagerkonzept. Für den Fall einer positiven Eignungsbewertung des Standortes dienen die Ergebnisse für die Planung der untertägigen Erkundungsarbeiten.

Im Verlaufe der übertägigen Standorterkundung erfolgt die Durchführung der geologisch-geophysikalischen Untersuchungen in einem kleineren Maßstab (meist 1 : 50.000 oder 1 : 25.000) und auf räumlich enger begrenzten Gebieten als bei der Standortvorauswahl. Die wesentlichsten Methoden zur übertägigen Standorterkundung sind in Tabelle 4-10 zusammengefasst.

Tabelle 4-10: Methoden der übertägigen Standorterkundung

geologische und geomorphologische Kartierung der Erdoberfläche oder von Schürfen sowie Auswertung von Flachbohrungen (bis ca. 10 m tief)
Laserscan-Befliegungen des Oberflächenreliefs und spezielle Auswertung von geologischen Kartenwerken zwecks Identifizierung von Störungszonen und lithologischen Grenzen
Auswertung von Luftbildaufnahmen bzw. Fernerkundungsdaten zur Ausweisung von mächtigen Störungszonen
aerogeophysikalische Messungen, z. B. zur Bestimmung der Lagerungsverhältnisse und der Mächtigkeit sedimentärer Deckgebirgsschichten oder zum Nachweis von mächtigen Störungszonen
geodätische Präzisionsnivelements und/oder Satelliten- bzw. Flugzeug-gestützte Messungen (z. B. mittels GPS) zwecks Bestimmung der Hebungs- und Senkungs-raten einzelner geologisch-tektonischer Blöcke

von Übertage ausgeführte tiefe Erkundungsbohrungen und geophysikalische Untersuchungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen zur Analyse des geologischen Baus des Fernfeldes und des Wirtsgesteins
hydrogeologische Messungen in den Erkundungsbohrungen zwecks Analyse der Grundwasserströmungsverhältnisse und der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine im Nah- und Fernfeld des geplanten Endlagers
felsmechanische und thermophysikalische Untersuchungen an Bohrkernproben
Bestimmungen der In-situ-Stressbedingungen, z. B. mittels Überbohrversuchen
mineralogisch-geochemische Untersuchungen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und des Deck- bzw. Nebengebirges
geochemische Untersuchungen der Grundwässer, z. B. zur Bestimmung der Grundwasserdynamik und -verweilzeiten oder zum Nachweis von Mixingprozessen

Besondere Schwerpunkte bei der übertägigen Standorterkundung bilden die geophysikalischen und hydrogeologischen Untersuchungen. Die wesentlichsten Ziele der **geophysikalischen** Untersuchungen sind in Tabelle 4-11 zusammengestellt.

Tabelle 4-11: Ziele geophysikalischer Untersuchungen im Rahmen von Standorterkundungsarbeiten

Bestimmung der räumlichen Ausdehnung, der Tiefenlage und Mächtigkeit der geologischen Schichten
Abgrenzung stratigraphischer, fazieller oder petrographischer Einheiten
Erkundung der Lagerungsverhältnisse der Gesteine
Nachweis von Störungs- bzw. Klüftzonen
Nachweis von Hohlräumen und Auflockerungsbereichen
Erkundung der räumlichen Lage des Grundwasserspiegels, der wasserführenden Schichten und Klüftsysteme
Erkundung von Anomalien, die auf Fernerkundungsdaten basieren
Bestimmung physikalischer Eigenschaften und Ableitung von Gesteinsparametern (Feuchtigkeit, Porosität, Festigkeit, Dichte, Elastizität, Leitfähigkeit etc.)

Die oberflächlich eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Wirtsgestein. Während bei Standorterkundungen im Salz vorwiegend seismische Untersuchungsverfahren zur Abgrenzung der Struktur und zur Analyse des Deck- und Nebengebirges eingesetzt werden, finden im Kristallin bevorzugt geoelektrische und elektromagnetische Methoden zum Nachweis von Störungszonen Anwendung. Für die Erkundung von Tongesteinsformationen werden sowohl seismische wie auch geoelektrische und geomagnetische Methoden zur Charakterisierung des Deckgebirges und des Wirtsgesteins eingesetzt. Durch eine Kombination mehrerer geophysikalischer Methoden (z. B. durch den Einsatz von Multisonden) kann die Zuverlässigkeit der sich daraus ergebenden geologischen Aussagen gesteigert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der übertägigen Erkundungsarbeiten ist an allen Standorten die **hydrogeologische** Charakterisierung des Nah- und Fernfeldes (siehe [IAEA 1999]). Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen stehen die Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse im Deck- und Nebengebirge, d. h. die Ausweisung bzw. Abgrenzung von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern, sowie die Analyse der Grundwasserbeschaffenheit (z. B. Eh-pH-Verhältnisse, Sauerstoffsättigung, chemische Zusammensetzung und Alter der Grundwässer). Im Ergebnis dieser Arbeiten liegen detaillierte Informationen zur Geometrie der Grundwasserfließsysteme und zu den hydraulischen Eigenschaften der hydrostratigraphischen Einheiten (Transmissivität, Permeabilität, Porosität) sowie zu den aktuell ablaufenden Grundwasserbewegungen vor. Wichtig für die langzeitsicherheitliche Bewertung des Endlagerstandortes sind Prognosen zur Änderung der Grundwasserfließverhältnisse durch klimatische oder geodynamische Prozesse (z. B. Vereisungen, Überflutungen, tektonische Hebungen oder Absenkungen, Änderung der Spannungsverteilungen und Neubildung bzw. Reaktivierung von Störungszonen) sowie zum Einfluss der Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen auf die Grundwasserfließverhältnisse.

Neben Untersuchungen in geologischen Aufschlussbohrungen werden hierfür spezielle flächendeckende Bohrprogramme unter Einschluss von hydrogeologischen Bohrungen, Pegelbohrungen oder Brunnen sowie geophysikalischen Methoden eingesetzt (siehe z. B. [Schreiner & Kreysing 1998], [Langguth & Voigt 2004]). Die eingesetzten Methoden und der Umfang der Untersuchungen richten sich nach den regionalen geologischen Verhältnissen und den Eigenschaften der Wirtsgesteine bzw. des Deckgebirges sowie nach der Größe des Untersuchungsgebietes. Am Verbreitetsten bei der Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften sind Permeameterversuche (Lockergesteine), Einschwingversuche (Porengrundwasserleiter), Pumpversuche (Porengrundwasserleiter und Kluftwasserleiter), Tracertests und Injektionstests.

Ergänzend werden in Laboruntersuchungen Bestimmungen der hydraulischen Gesteinsparameter durchgeführt (z. B. Korngrößenanalysen, Durchlässigkeit und Sorptions- bzw. Diffusionseigenschaften der Gesteine; z. B. [NAGRA 1999], [NAGRA 2004]). Nach der Bestimmung der geologisch-hydrogeologischen Kenndaten werden diese Daten zur Erstellung geologischer Standortmodelle genutzt und numerische Modelle entwickelt, um die hydraulischen Verhältnisse abzubilden und mögliche Schadstoffmobilisationen bzw. -transporte zu berechnen.

Außerdem erfolgen umfangreiche Bohrprogramme mit tiefen Erkundungsbohrungen zwecks Analyse des lithologischen Aufbaus und der Mächtigkeit des Deckgebirges bzw. des Nebengesteins, der Bestimmung der Verbreitung, Eigenschaften und Zusammensetzung des Wirtsgesteins sowie zum Nachweis von möglicherweise im Umfeld des geplanten Endlagerstandortes vorkommenden hydraulisch aktiven Störungszonen. In den Bohrungen werden geophysikalische, hydraulische und felsmechanische Messungen zur Gebirgscharakterisierung durchgeführt [Hammer & Sönke 2009]. Die Tiefbohrungen ermöglichen zudem die Eichung seismischer Untersuchungen. Durch die Kombination von Oberflächenseismik und Bohrlochseismik können die Erkundungsergebnisse verbessert werden.

An Kernproben werden Laborversuche zur Bestimmung felsmechanischer, hydrogeologischer, thermophysikalischer und chemischer Parameter sowie mineralogisch-geochemische Untersuchungen durchgeführt. Die Laborversuche liefern wichtige Daten, die als Eingangsparameter Grundlage für die Erstellung und Validierung von geomechanischen Modellen sowie für numerische Berechnungen im Rahmen von Standsicherheitsbewertungen, Integritätsnachweisen und Langzeitsicherheitsanalysen sind. Ein Schwerpunkt ist die Charakterisierung des Deformationsverhaltens der Gesteine. Sie umfasst die Bestimmung der petrophysikalischen Gesteinsparameter und dient auch der Herleitung der geomechanischen Materialgesetze für das Kurz- und Langzeitverhalten der Wirtsgesteine. Hierzu zählen insbesondere das Kompaktionsverhalten, die Spannungs-Deformations-Beziehungen sowie die Beschreibung der erwarteten Bruchmechanismen als Funktion des Spannungszustands.

4.4.2 Übertägige Standorterkundung in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Die unterschiedlichen endlagerrelevanten Eigenschaften von Steinsalz, Tonstein und Kristallin bestimmen die gesteinspezifischen Erkundungsziele und damit die einzusetzenden Untersuchungsmethoden.

Steinsalz

Ausgehend von den Auswahlkriterien (siehe Kap. 4.1) und den Daten, die für den vorläufigen Eignungs- bzw. Langzeitsicherheitsnachweis für einen HAW-Endlagerstandort in Salzformationen erforderlich sind, ist die übertägige Erkundung von Salzformationen auf die in Tabelle 4-12 zusammengestellten Ziele ausgerichtet.

Tabelle 4-12: Untersuchungsziele bei der übertägigen Erkundung von potenziellen Endlagerstandorten in Salinarstrukturen

äußere Form der Salzstruktur und Tiefenlage der Salzgesteine
Tiefenposition und struktureologischer Bau des Sockels, z. B. der Zechsteinbasis (Zerblockungsgrad, mächtige Störungszonen im Liegenden der Salzstruktur)
erste Informationen zum Internbau der Salzstruktur, wie z. B. Baustil, Heterogenität, Mächtigkeit und Verteilung der Steinsalzschieben, Kalisalze und Anhydritlagen
lithologische Zusammensetzung, Schichtenfolge und -mächtigkeiten im Deck- und Nebengebirge bzw. in den Randsenken (z. B. Aufstiegsgeschwindigkeiten und Entwicklungsstadium eines Salzstocks)
Daten zur Intensität der natürlichen Ablaugung (Ablaugungsraten), zur Mächtigkeit und zum Aufbau des Hutgesteins
struktur- und hydrogeologische Analyse des Deckgebirges, wie z. B. Vorhandensein von Scheitelgräben, Verbreitung von Grundwasserleitern und -hemmern, Vorkommen von quartären Rinnen oder Subrosionssenken
regionales Temperaturfeld und Temperaturen im geplanten Endlagerniveau
Ergebnisse spezieller hydrogeologischer Untersuchungen im Deckgebirge (hydraulische Gradienten, Hydrochemie der Grundwässer, Verweilzeiten)

seismische Aktivitäten in der Nähe des geplanten Endlagers, Vorkommen neotektonisch aktiver Störungszonen
Hebungs- bzw. Senkungsraten von geologischen Einheiten im Umfeld des Salzstockes

Ausgehend von den genannten Erkundungszielen wird für die übertägige Erkundung von Salzstöcken eine Kombination von Reflexionsseismik (eventuell ergänzt durch gravimetrische Messungen), Erkundungsbohrungen (inklusive Bohrlochgeophysik) und detaillierten mineralogisch-geochemischen- Bearbeitungen der Bohrkern eingesetzt (z. B. [Jaritz 1979], [Jaritz 1983], [Bornemann et al. 2008]).

Zur Erkundung des Internbaus der Salzstrukturen werden tiefe Erkundungsbohrungen gestoßen, die aber möglichst nur am Rand der Salzstruktur oder in Form von Schachtvorbohrungen eingesetzt werden, um die Schutzfunktionen der geologischen Barriere Steinsalz nicht zu beeinträchtigen. In diesen Bohrungen werden neben radiometrischen Verfahren (z. B. Gamma- und Gamma-Gamma-Dichte-Logs) auch elektromagnetische Reflexionsmessungen (EMR) eingesetzt, die in salinaren Formationen wertvolle Informationen zur Internstruktur, d. h. zur räumlichen Lage von Anhydrit- und tonhaltigen Schichten oder Kaliflözen liefern. An Bohrkernen aus den salinaren Schichten werden umfangreiche mineralogisch-geochemische- und geomechanische Laboruntersuchungen durchgeführt (Tabelle 4-13). Zusätzlich werden zahlreiche Salzspiegelbohrungen gestoßen, um die Genese, den Aufbau und die Eigenschaften des Hutgesteins der Salzstruktur zu untersuchen (ausführlicher siehe [Hammer & Sönke 2009]).

Tabelle 4-13: Untersuchungsziele der Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus Salinarformationen

Analyse der Gehalte der chemischen Hauptkomponenten zur Bestimmung des quantitativen Mineralbestandes der Salzgesteine
Analyse ausgewählter Spurenelemente als genetische Indikatoren, z. B. Br, Rb, Sr
Analyse der stabilen Isotope $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ zwecks Klärung der Bildungsbedingungen und der stratigraphischen Zuordnung der Gesteine
mineralogisch-geochemische Analyse der in den Salzgesteinen vorkommenden Kluftmineralisationen zur Klärung ihrer Genese und ihres Alters
petrographische Untersuchungen zur Analyse der Genese sowie der Deformations- und Alterationsprozesse der Gesteine
Analyse der chemisch-physikalischen Radionuklidrückhalteeigenschaften der Gesteine des Nah- und Fernfeldes (z. B. Bestimmung des Sorptions- bzw. Komplexbildungsvermögens, der Diffusionseigenschaften und der Eh-pH-Verhältnisse)
Analyse der geomechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften der Gesteine

Die im Rahmen der Erkundung des Salzstocks Gorleben durchgeführten Untersuchungen (z. B. [Zirngast 1985], [Köthe et al. 2007], [Klinge et al. 2007], [Bornemann et al. 2008]) sind

ein Beispiel für die detaillierte übertägige geologisch-geophysikalische Erkundung eines potenziellen HAW-Endlagerstandortes in Salinarformationen.

Tongesteine

Die übertägige geologische Erkundung von potenziellen HAW-Endlagerstandorten in tonigen Gesteinen muss präzise Daten zu den in Tabelle 4-14 genannten Themenkomplexen vorlegen, um auf deren Basis eine vorläufige standortbezogene Langzeitsicherheitsanalyse vornehmen zu können.

Tabelle 4-14: Untersuchungsziele bei der übertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Tonsteinformationen

Tiefe, Verbreitung und Mächtigkeit der tonigen Wirtsgesteinsformation
Aufbau und Eigenschaften des Deckgebirges (z. B. Existenz von Quartärrinnen, Vorkommen von mächtigen Störungszonen, Durchlässigkeiten und hydraulische Potenziale in den Deckgebirgsschichten, Hydrochemie der Grundwässer zur Bestimmung von Alter, Verweilzeit und Fließgeschwindigkeit)
Lagerungsverhältnisse im Deckgebirge und im Wirtsgestein (z. B. Einfallen, Verfaltung, Mächtigkeitsschwankungen, tektonische Störungen, räumliche Orientierung von Kluft- und Störungssystemen)
Lithologie der Gesteinsformation (z. B. Heterogenität, Faziesverteilung, Diagenese- bzw. Metamorphosegrad, Porosität)
mineralogisch-geochemische Zusammensetzung der tonigen Gesteine (z. B. Tonmineralbestand, C _{org} -, Karbonat- und Wassergehalte)
Ausweisung geeigneter Homogenbereiche im Wirtsgestein
Sorptions-, hydraulische, geomechanische und thermische Eigenschaften der Wirtsgesteine (z. B. Langzeitpacker- oder Tracertests)

Bei der übertägigen Erkundung von Tongesteinsstandorten werden umfangreiche geophysikalische Erkundungsprogramme sowie zahlreiche tiefe Erkundungsbohrungen (deutlich mehr als im Steinsalz) durchgeführt, um Homogenbereiche mit günstigen physikalischen Eigenschaften ausweisen zu können. Einen zentralen Platz nehmen dabei die geophysikalischen Messungen in den von Übertage ausgeführten Erkundungsbohrungen ein. Die bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen dienen vor allem zur besseren Korrelation der Bohrungen und zur stratigraphischen Einordnung sowie zur stofflich-strukturellen Charakterisierung der Schichten und zum Nachweis der für den Endlagerbau erforderlichen Homogenität der Tongesteine (z. B. Nachweis von Sandeinlagerungen und Analyse der Tonmineralgehalte). Aufgrund der makro- und mikroskopisch häufig schwierigen lithologischen Unterscheidung einzelner Schichten im Tongestein und meist fehlender paläontologischer Befunde bilden sie oft die einzige zuverlässige Grundlage für die Interpretation und Korrelation von Bohrungen untereinander.

Häufig gestattet die gemeinsame Auswertung mehrerer Logs (Abbildung 4-7) eindeutigere Aussagen zu den Eigenschaften der Gesteine. So z. B. stützen sich Bestimmungen der Po-

rosität idealerweise auf die komplexe Interpretation der Ergebnisse von Akustik-, Dichte- und Neutronmessungen [Hoth et al. 2007].

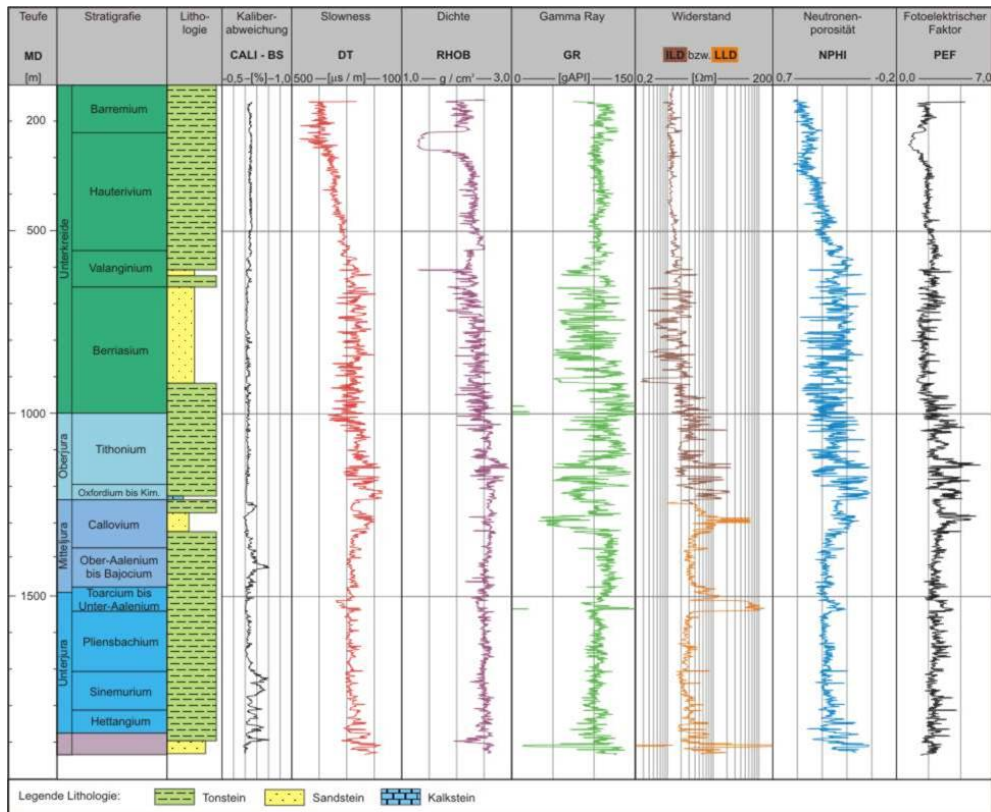


Abbildung 4-7: Beispiel für komplexe geophysikalische Untersuchungen in einer Erkundungsbohrung mit mächtigen Tonschichten, nahe Hannover-Wietze [Hoth et al. 2007]

Ebenfalls in den Erkundungsbohrungen werden mittels „Formation Micro Imager“, Kalibermessungen und Packerabdrücktests sowie durch Hydraulic Fracturing die Lage der Hauptspannungsrichtungen bzw. die In-situ-Spannungen in den Tongesteinsschichten bestimmt.

Zur Charakterisierung ihrer thermophysikalischen Eigenschaften muss bei Tongesteinen ihr Diageneseegrad bzw. ihre Versenkungs-/Temperaturgeschichte (mit variierender Mächtigkeit der Auflast) untersucht werden. Dafür werden z. B. Messungen der Vitritreflexion und des Reifegrades der organischen Substanzen sowie Analysen der Apatitspaltspuren durchgeführt. Auf der Grundlage der so bestimmten Temperaturbelastung können Prognosen zu ihrem thermodynamischen Verhalten getroffen werden.

Beispiele für die übertägige Erkundung von Standorten im Tonstein sind die Endlagerprojekte in Frankreich und in der Schweiz (siehe [Hammer & Sönke 2009]).

Kristallin

Im Gegensatz zu Steinsalz und Tongestein stellen kristalline Wirtsgesteine nicht die Hauptbarriere zur langfristigen Isolierung der radioaktiven Abfälle dar. Diese Aufgabe übernehmen Endlagerbehälter und geotechnische Barrieren. In der als wenig wahrscheinlich eingeschätzten Entwicklung des Endlagers sind Radionuklidfreisetzungen aus HAW-Endlagern in kristallinen Gesteinen aufgrund der geringen effektiven Porositäten und niedrigen Permeabilitäten der ungestörten Gesteinsmatrix im Wesentlichen auf advective Prozesse in hydraulisch aktiven Klüften bzw. tektonischen Störungszonen beschränkt. Die Suche nach geeigneten Endlagerstandorten im Kristallin konzentriert sich daher auf das Auffinden von wenig gestörten, undeformierten Gesteinsbereichen weit entfernt von mächtigen, hydraulisch aktiven, tief reichenden Grundwassermigrationsbahnen. Außerdem sollten Endlagerstandorte im Kristallin nur geringe lithologische Inhomogenitäten bzw. Anisotropien in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften der Gesteine aufweisen. Ausgehend von diesen Anforderungen sind die übertägigen geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten an Standorten in kristallinen Gesteinen vor allem auf die Sammlung von Daten zu den in Tabelle 4-15 genannten Themenkomplexen ausgerichtet.

Tabelle 4-15: Untersuchungsziele der übertägigen Erkundungsarbeiten an potenziellen Endlagerstandorten in kristallinen Gesteinen

laterale und teufenmäßige Verbreitung der kristallinen Wirtsgesteine
Nachweis von Heterogenitäten (z. B. Einschlüsse, Kontaktbereiche, Gänge)
Verbreitung, räumliche Orientierung, Vernetzung sowie Öffnungsgrad und evtl. mineralogische Füllung von Störungszonen bzw. potenziellen Grundwasserfließwegen im Nah- und Fernfeld des Endlagers
Vorkommen und hydraulische Eigenschaften von Poren- (im Deck- und Nebengebirge) und Klufftgrundwasserleitern
Physikochemie und Alter der Grundwässer
Gebirgsspannungen (Spannungsbeträge und -richtungen)
Anisotropien in der Zusammensetzung und in den gebirgsmechanischen, thermischen und mineralogisch-geochemischen Eigenschaften der Gesteine
durch präzise seismologische Beobachtungen, geotektonische und geomorphologische Analysen bzw. geodätische Messungen gestützte Angaben zu den seismischen und neotektonischen Aktivitäten und zu den Hebungs- bzw. Absenkungsraten im Untersuchungsgebiet

Im Vergleich zu Salinarformationen, für die auf der Grundlage nur weniger Erkundungsbohrungen ausgehend von salzgenetischen Modellvorstellungen relativ gut abgesicherte Prognosen zum Internbau, d. h. zur Ausweisung von Homogenbereichen, aber auch zum Vorkommen von salzstockinternen Lösungen sowie von Anhydriten und Kalisalzen innerhalb der Salzstruktur möglich sind, ist für kristalline Gesteine eine schlechte Prognostizierbarkeit des Baus und der Eigenschaften charakteristisch.

Neben der geologischen Kartierung, insbesondere durch übertägige Erkundungsbohrungen, die im Unterschied zur Salzerkundung meist geneigt sind, werden bei der Untersuchung von Kristallin-Standorten meist umfangreiche geophysikalische Messungen durchgeführt. Im Unterschied zu Standorten im Salz, die fast ausschließlich mittels seismischer Messverfahren untersucht werden, sind kristalline Gesteine durch diese Methode nur schlecht zu charakterisieren. Verantwortlich dafür sind die fehlenden seismischen Kontraste und die oft steil einfallenden Störungszonen, die meist nur ungenügend detektierbar sind. 2D- oder 3D-Seismik kommt lediglich bei mächtiger Sedimentüberdeckung zur Bestimmung der Lage der Festgesteinsoberfläche und zum Nachweis von flach einfallenden Störungen im Deckgebirge zum Einsatz.

An den meisten Standorten werden für die Bestimmung von Störungszonen oder Inhomogenitäten vor allem geoelektrische, geomagnetische und gravimetrische Messungen von der Oberfläche und in Erkundungsbohrungen eingesetzt. Die Auswahl der konkreten Messverfahren ist von der Mächtigkeit und Leitfähigkeit der Gesteinskomplexe abhängig.

In den häufig bis in das geplante Endlagerniveau reichenden Bohrungen erfolgen umfangreiche bohrlochgeophysikalische und hydraulische Messungen. Die Identifizierung und Charakterisierung von Störungszonen in den Bohrungen bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld erfolgt vor allem durch Messungen der elektrischen Leitfähigkeit, der natürlichen Gamma-Aktivität, der magnetischen Suszeptibilität und der Temperatur sowie durch eine Kombination von akustischem Bohrlochfernsehen (Borehole Image Processing System, BIPS), Dipmetermessungen und optischem Televier (Detektierung von Bohrlochwandausbrüchen). Die Dipmeter-Logs dienen zur Bestimmung des Einfallens der in den Bohrungen angetroffenen Schichtgrenzen bzw. Kontakte sowie Störungszonen. Ergänzend durchgeführte geophysikalische Scherwellen-Messungen (VSP) mit einem 3-Komponenten-Geophon-System und Bohrloch-Radarmessungen ermöglichen eine bessere Auswertung von oberflächlich durchgeführten seismischen Messungen und den Nachweis von Reflektoren bzw. Störungszonen im Bohrungsumfeld oder im Zwischenraum von Bohrungen.

Bei fehlender oder nur geringmächtiger Sedimentbedeckung der kristallinen Gesteine kann ein Teil der Erkundung, insbesondere der Störungszonennachweis, mittels aerogeophysikalischer Untersuchungen unter Verwendung moderner Hubschrauber- oder Flugzeuggestützter Messverfahren sowie durch Einsatz anderer Fernerkundungsmethoden (z. B. Auswertung von Luftbild- bzw. Satellitenaufnahmen oder spezielle Laser-Scanner-Befliegungen, z. B. mittels LIDAR) erfolgen. Insbesondere elektromagnetische (Multi-Frequenz-EM, VLF), magnetische und radiometrische Messmethoden ermöglichen die Abgrenzung von Störungszonen und Aussagen zur Homogenität der untersuchten Gesteinskomplexe.

Kristallingesteine weisen aufgrund ihrer Entwicklung häufig ein kompliziertes, anisotropes Spannungsfeld auf (siehe [Hammer et al. 2009]), das Auswirkungen auf die felsmechanischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften hat. Für die In-situ-Bestimmung von Größe und Orientierung der Spannungsvektoren werden meist Hydro-Frac-Verfahren sowie Überbohrverfahren angewandt. Dabei ist die Erkundung eines Kristallin-Standortes nicht nur auf die Analyse der aktuellen struktur- und hydrogeologischen Standortrandbedingungen ausge-

richtet, sondern auch auf eine Bewertung und Prognose der seismischen und tektonischen Prozesse im Umfeld des Standortes. Da in der Nähe von Endlagerstandorten im Kristallin häufig mächtige Störungszonen liegen, ist ein Monitoring der Blockverschiebungen in diesen Bereichen notwendig (Abbildung 4-8).

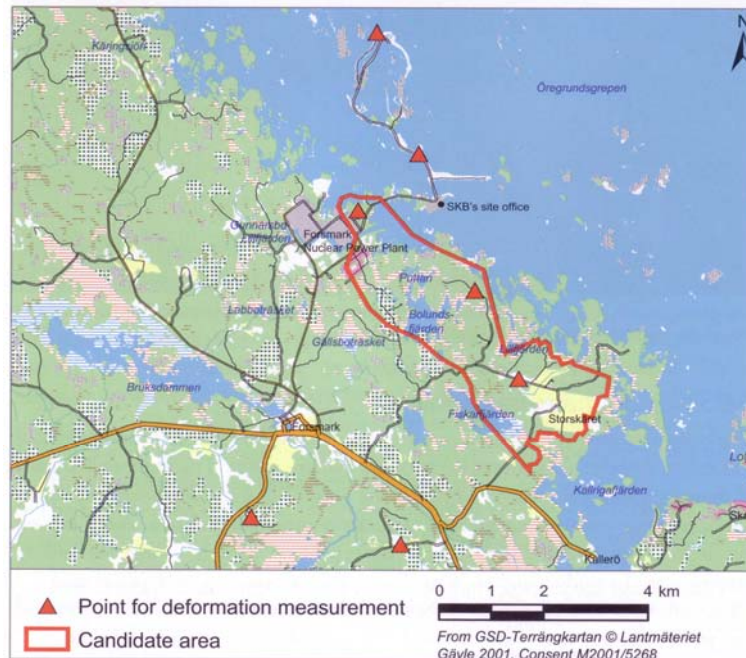


Abbildung 4-8: Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Blockverschiebungen am potenziellen HAW-Endlagerstandort Forsmark, Schweden [SKB 2005b]

Beispiele für Standorterkundungen im Kristallin sind die Endlagerprojekte in Schweden, wo vor allem die Standorte Forsmark [SKB 2005b] und Oskarshamn [SKB 2005a] umfangreich untersucht wurden, und die Standortuntersuchungen in Finnland (Olkiluoto, [Posiva 2005]).

4.4.3 Untertägige Standorterkundung – Ziele und wirtsgesteinsunabhängige Erkundungsmethoden

Im Rahmen der untertägigen Standorterkundung werden vor allem die standortspezifischen Daten zum Wirtsgestein und zu den Gebirgseigenschaften vertieft sowie In-situ-Untersuchungen zu den Auswirkungen endlagerrelevanter Prozesse auf die Barriereigenschaften und die Langzeitsicherheit des Endlagers durchgeführt (Tabelle 4-16). Die Untersuchungen werden in Untertagelabors (URL) oder in Erkundungsbergwerken durchgeführt. Die Arbeiten bilden die Grundlage für die Führung eines endgültigen Eignungsnachweises für den Endlagerstandort.

Tabelle 4-16: Untersuchungsziele der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten

detaillierte stofflich-strukturelle Charakterisierung des Endlagerwirtsgesteins
Analyse des strukturgeologischen Baus der Wirtsgesteine (z. B. Vorkommen und Orientierung von Klüften bzw. Störungszonen, Faltung, Inhomogenitäten)
Bestimmung der In-situ-Spannungsverhältnisse (Größe und räumliche Orientierung der Spannungsvektoren, Variation der Spannungsfelder mit zunehmender Tiefe)
Untersuchung endlagerrelevanter Prozesse, wie z. B. Verhalten des Wirtsgesteins bei der Einlagerung von Wärme entwickelnden hochradioaktiven Abfällen
Analyse des Einflusses hydraulischer, geochemischer und physikalischer Parameter auf den Transport von Radionukliden
Untersuchung der Prozesse im Nahfeldbereich (Wärmeabtransport, Spannungsauf- und -abbau, Druck- und Temperatur-abhängige Deformationen)

Diese Untersuchungen werden durch konzeptbezogene Untersuchungen ergänzt, um geplante Methoden und Einlagerungskonzepte im Maßstab 1:1 zu testen und zu optimieren sowie ihre bautechnische Machbarkeit zu überprüfen (Tabelle 4-17).

Tabelle 4-17: Konzeptbezogene Untersuchungen

Demonstrationsversuche zur Interaktion zwischen der geologischen und den (geo)technischen Barrieren (z. B. Gasmigration, Radionuklidretardation)
Weiterentwicklung der technischen und geotechnischen Barrieren unter In-situ-Bedingungen
In-situ-Studien zur Optimierung des Designs des Endlagers und der Geometrie der Einlagerungsstrecken
Untersuchungen zur Optimierung der Methoden der bergmännischen Auffahrungen sowie der Bohr- und Sprengverfahren
Optimierung von Erkundungs- und Monitoringmethoden, die beim Endlagerbau bzw. -betrieb sowie in der Nachbetriebsphase zum Einsatz kommen
Demonstration der Einlagerungstechnik bzw. Tests der Technik unter realen Bedingungen

Die bei der untertägigen Erkundung durchzuführenden Arbeiten sind vom Wirtsgesteinstyp, d. h. von den gesteinspezifischen Erkundungszielen, vom Endlagerkonzept und von den, für die Langzeitsicherheitsanalyse erforderlichen Daten abhängig. Die Untersuchungsverfahren können untergliedert werden in:

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

Geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen

Im Rahmen der untertägigen geologisch-geophysikalischen Standortuntersuchung werden detaillierte Analysen des strukturellen Baus, der Zusammensetzung und der Eigenschaften

der Wirtsgesteinsformation durchgeführt. Außerdem erfolgt mit dem Ziel der Beweissicherung eine lückenlose Dokumentation der bei der Auffahrung des Erkundungs- bzw. Endlagerbergwerkes angetroffenen Standortgegebenheiten. Auf der Grundlage der Ergebnisse der geologischen Erkundungsarbeiten wird, ggf. unter Ausweisung von Sicherheitspfeilern zu Störungszonen oder zu Gesteinstypen bzw. -bereichen, die für die HAW-Einlagerung ungeeignet sind, die Ausweisung potenzieller Einlagerungsbereiche vorgenommen.

Die geologische Erkundung erfolgt unter Tage vor allem durch Schächte und Strecken, deren Stöße, angepasst an den bergmännischen Teuf- bzw. Vortriebsfortschritt, im Maßstab 1:100 bzw. 1:50 schrittweise und vollständig kartiert sowie dokumentiert werden. Die geologische Kartierung wird durch die geologische Aufnahme und Fotodokumentation von Bohrkernen sowie Probenahmen an den Stößen und Bohrkernen ergänzt. Die Kartierung beinhaltet die Erfassung sämtlicher, im Maßstab darstellbarer tektonischer und Strukturelemente, wie z. B. Störungen, Klüfte, Faltenachsen und Schichtflächen. Bereits bei den Kartierarbeiten und im Ergebnis nachfolgender, z. B. mikroskopischer, röntgendiffraktometrischer oder geochemischer Laboruntersuchungen werden die in den Aufschlüssen angetroffenen Gesteine lithologisch, petrographisch und mineralogisch-geochemisch charakterisiert.

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

Die Erkundung des Wirtsgesteins im Nah- und Fernfeld des geplanten HAW-Endlagers erfolgt durch geologische Erkundungsbohrungen, die von den Schächten oder Strecken ausgehen, sowie durch geophysikalische Messungen. Daneben werden zahlreiche Bohrungen für wissenschaftliche Versuche, zur Installation von Messtechnik, zur Streckenplanung oder zur gezielten Beprobung der Wirtsgesteinsformation gestoßen. Lage, Durchmesser und Länge der Bohrungen werden den Versuchen bzw. der Versuchstechnik angepasst. Ein Großteil der Bohrungen wird gekernt und geophysikalisch vermessen, um Informationen zum Aufbau und zu den Eigenschaften der geologischen Barriere zu erhalten. Die dabei eingesetzten Bohrlochmessverfahren hängen vom Wirtsgesteinstyp ab (siehe [Hammer & Sönke 2009]).

Auf der Grundlage der Ergebnisse der geologischen Aufnahme der Erkundungsbohrungen und der Kartierung der Auffahrungen werden geologische Übersichtskarten und Schnitte angefertigt. Basierend auf einer komplexen und integralen Interpretation aller Erkundungsergebnisse wird ein geologisches 3D-Standortmodell erarbeitet. Dieses Modell wird bei Vorlage neuer Erkundungsdaten fortlaufend aktualisiert bzw. präzisiert. Es dient als Grundlage für die Bergwerksplanung und die Planung der Vorfelderkundung sowie für die Auswertung und Interpretation der geologisch-geophysikalischen und geotechnischen Erkundungsergebnisse. Außerdem bildet das geologische Lagerstättenmodell die Basis für

erkundungsbegleitende (z. B. Abstandsfestlegung zu ungeeigneten Gesteinspartien) oder nachfolgende numerische Modellierungen.

Geophysikalische Untersuchungsverfahren werden bei der untertägigen Standorterkundung vor allem zum Nachweis und zur Charakterisierung von Auflockerungs- bzw. Störungszonen und von kleinräumigen Inhomogenitäten im Nahfeld des geplanten Endlagers sowie zur In-situ-Bestimmung von Gesteinseigenschaften eingesetzt. Hierfür werden neben Messungen in den Strecken vor allem Bohrlochmessverfahren verwendet. Zur Charakterisierung von auffahrungsnahen Störungs- und Klüftzonen werden in salinaren und kristallinen Gesteinen häufig mikroseismische Messungen durchgeführt, meist in Kombination mit geoelektrischen bzw. elektromagnetischen Messungen.

Geomechanische und thermophysikalische Untersuchungsmethoden

Untertägige geomechanische Untersuchungen dienen zur Messung des primären Gebirgsspannungszustandes bzw. zur Erfassung von Spannungsänderungen zwecks Analyse des Verformungsverhaltens des Gebirges sowie zur Ermittlung der standortspezifischen geomechanischen Materialparameter im Bereich des geplanten Endlagerbergwerkes (Tabelle 4-18). Auf der Grundlage dieser Daten erfolgt eine Präzisierung der Bergwerksplanung sowie der Streckenausbau, die geomechanische Einschätzung der Barriere (z. B. „Selfsealing-Eigenschaften“) und der für den Langzeitsicherheitsnachweis erforderliche Nachweis der geomechanischen Stabilität des geplanten Endlagerbergwerkes.

Tabelle 4-18: Übersicht zu geomechanischen Untersuchungen im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung (In-situ-Messungen und Laboruntersuchungen)

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

Tabelle 4-19 gibt einen Überblick zu den Zielen und Methoden der bei der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten durchgeführten felsmechanischen Untersuchungen.

Ausführlichere Beschreibungen der eingesetzten Untersuchungsmethoden sind in [Bräuer et al., in Vorb.] und [Hammer & Sönneke 2009] enthalten.

Tabelle 4-19: Übersicht zu Zielen und Methoden felsmechanischer In-situ-Versuche

Untersuchungsziel	Methode (In-situ-Messungen)
Ermittlung der Gebirgs- und Gesteinseigenschaften	
Gebirgstemperatur, geothermischer Gradient, Temperaturänderungen	Temperaturmessungen
Orientierung/Verlauf von Bohrungen	Bohrlochverlaufsmessungen
Standfestigkeit und Materialverhalten	
elastisches Verformungsverhalten/ Bohrlochdeformation, Lastdeformationsverhalten	Dilatometermessungen
Verformungsverhalten des Gebirges	Verformungsmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Konvergenzmessungen • Extensometermessungen • Inklinometermessungen
Rissausbreitung, -orientierung im Bereich von Hohlräumen	Fissurometermessungen
Untersuchungen zu den Gebirgsspannungen (Ermittlung von Primär-, Sekundärspannungen, Spannungsänderungen)	
Spannungsfeld (Spannungsorientierung, Spannungswerte)	Entlastungsmethoden (Kurzzeitmessungen) <ul style="list-style-type: none"> • Überbohrmethode • Hydraulic-Fracturing-Methode • Bohrlochschlitzmethode
Sekundärspannungen (Langzeitmessungen)	
Gebirgsspannungen (Druckänderungen im Gebirge)	Spannungsmonitorstationen (hydraulische Druckkissen, Druckmessdosen)
Standfestigkeit (Druckänderungen zwischen Ausbau und Gebirge)	Spannungsmonitorstationen (hydraulische Druckkissen, Druckmessdosen)
Spannungsfeld (Spannungsrichtung)	Analyse von Borehole-Breakouts

Die geotechnischen In-situ-Messungen werden nicht nur in der Erkundungsphase durchgeführt, sondern häufig als Wiederholungs- bzw. Dauermessstellen in der Betriebsphase fortgeführt, um zeitabhängige Veränderungen zu erfassen. Meist erfolgt eine automatische Datenregistrierung. Die Messungen werden auf der Basis geologischer Vorgaben an repräsentativen Stellen im Grubengebäude durchgeführt. Außerdem werden überwachtungswürdige Bereiche und das Umfeld bestimmter Experimente (z. B. Heater-Experiment oder Mine-by-Test) überwacht.

Hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsverfahren

Die Ziele der untertägig durchzuführenden hydrogeologischen Erkundungsarbeiten sind in Tabelle 4-20 zusammengefasst.

Tabelle 4-20: Untersuchungsziele hydrogeologischer In-situ-Untersuchungen

Untersuchungen der hydraulischen Gebirgseigenschaften im ungestörten Wirtsgestein (Ermittlung des Einflusses von petrographischen und faziellen Unterschieden, von Anisotropie und lateraler sowie vertikaler Variabilität)
Untersuchungen der hydraulischen Gebirgseigenschaften im Streckennahbereich (Auflockerungszone)
hydraulische Charakterisierung von Kluft- und Störungssystemen
Lokalisierung und detaillierte Charakterisierung möglicher Transportwege für Radionuklide (3D-Geometrie der Grundwasserleiter, Porenraum, Kluftnetzwerk, Einfluss des Endlagerbaus auf die Integrität des Gebirges)
Erarbeitung eines hydrogeologischen Standort- bzw. Grundwasserfließmodells
hydraulische Untersuchungen zur Wirksamkeit geotechnischer Barrieren
Analysen der Transport- und Rückhaltemechanismen für Radionuklide im Wirtsgestein und/oder in den Kluftsystemen (Studien zu Advektion, Diffusion, Sorption, Retention, etc.)
Probenahme für hydrochemische, inklusive isotopengeochemische Untersuchungen

Bei der hydrogeologischen Charakterisierung der Wirtsgesteine kommen überwiegend standardisierte Untersuchungsmethoden bzw. Tests zum Einsatz, wie Pumpversuche, Fluid-Logging, Slug-Tests, Injektions- bzw. Pulse-Tests und Tracerversuche.

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die hydrochemische Charakterisierung der Grundwässer. Die chemische Zusammensetzung der Wässer dient zur Ermittlung der Diffusions- und Retentionseigenschaften des Wirtsgesteins. Außerdem werden die Herkunft der Wässer, ihre Verweilzeiten und Alter sowie die Wechselwirkungen der Wässer mit den eingebrachten Materialien und Endlagerbehältern analysiert.

Untersuchungen endlagerrelevanter gekoppelter Prozesse

In der Praxis nimmt die Bedeutung von multidisziplinären, integralen wissenschaftlichen Versuchen (sogenannte „Schlüsselexperimenten“) zu, um die komplexen Prozesse, die in einem Endlager ablaufen, unter natürlichen Bedingungen zu untersuchen. Dies betrifft vor allem die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin, in geringerem Maße aber auch Salzgesteine. Im Verlaufe dieser komplexen, häufig sehr aufwändigen Untersuchungen wird der Einfluss verschiedener Parameter (wie z. B. Spannungsfeld, Porendruck, Feuchtigkeit bzw. Wassersättigung, Temperatur) und gekoppelter endlagerrelevanter THMC-Prozesse auf die langzeitliche mechanische und hydraulische Integrität der geologischen Barriere analysiert. Die Synthese der verschiedenen Untersuchungen soll unter Hinzunahme von Modellberechnungen ein besseres Prozessverständnis der komplexen Zusammenhänge im System Endlager/Wirtsgestein ermöglichen. Solche Untersuchungen wurden für Tongesteine z. B. im Felslabor Mont Terri [Bossart & Thury 2008] und im URL Meuse/Haute Marne [ANDRA

2005b] sowie für kristalline Gesteine im Felslabor Äspö [SKB 2008] und für Steinsalz in der Asse durchgeführt.

Beispiele für derartige Untersuchungen komplexer Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern und Prozessen sowie zwischen Gebirge und Endlager sind die in Tabelle 4-21 genannten interdisziplinären Experimente.

Tabelle 4-21: Endlagerrelevante gekoppelte Prozesse, die im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung untersucht werden

Untersuchung von Fließ- und Transportprozessen im ungestörten Gestein und entlang von tektonischen Trennflächen (insbesondere des Einflusses von hydro-mechanisch- und hydro-chemisch-gekoppelten Prozessen auf den Porenwasserfluss)
Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften unter Berücksichtigung von Fazieswechseln, EDZ, Störungen und Klüften
Analyse der maßstabsabhängigen Aspekte der hydraulischen Konduktivität (Einfluss von Anisotropie und Heterogenität verschiedener Faziesseinheiten)
Bestimmung der Porenwasserdruckentwicklung/-verteilung (besonders im Tonstein) in Abhängigkeit von den Milieuparametern
Änderung der Festigkeitseigenschaften durch Bewetterung
Wirkung und Ausdehnung der Auflockerungszone um Endlagerstrecken; geophysikalische, felsmechanische, hydraulische und strukturgeologische Untersuchungen der Trennflächenorientierung und der Ausdehnung der durch die Streckenauffahrung bzw. Spannungsumlagerung induzierten Trennflächen
Auswirkungen von Heater-Experimenten auf die hydraulischen und geomechanischen Gesteinseigenschaften und die geotechnischen Barrieren
Auswirkungen von radioaktiver Strahlung auf das Wirtsgestein bzw. die geotechnischen Barrieren (bisher nur im Steinsalz in der Asse analysiert)
Auswirkungen der Streckenauffahrung auf das Gebirge (Mine-by-Test)
Auswirkungen der Unterbrechung der Auflockerungszone durch eine geotechnische Barriere (hier Schlitzerstellung und Verfüllung mit Bentonit, Key-Experiment)
Pfeilveruche (Untersuchung der Festigkeitseigenschaften an einem Gebirgspfeiler im Maßstab 1:1)
Untersuchungen zur Verformung von Containern und Hohlräumen durch Veränderung des äußeren Spannungsfeldes (seismische Bewegungen, tektonische Störungen) und durch Kriechen
In-situ-Untersuchungen zur Sorption und Diffusion von Radionukliden an bzw. im Wirtsgestein (oder an bzw. in geotechnischen Barrieren)
Versuche zur In-situ-Aufsättigung der Bentonit-Barriere
In-situ-Versuche zur Korrosion der Container und zur Gasbildung bzw. -migration

4.4.4 Methoden der untertägigen Standorterkundung in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Unterschiede in den Eigenschaften und im geologischen Bau der verschiedenen Wirtsgesteinsformationen sowie in den daraus resultierenden wirtsgesteinsspezifischen Erkundungszielen führen dazu, dass die Schwerpunkte bei der untertägigen Standorterkundung und die dabei eingesetzten Untersuchungsmethoden für die einzelnen Gesteinstypen variieren.

Die untertägige Standorterkundung im Kristallin ist vorrangig auf den Nachweis und die Untersuchung von (hydraulisch aktiven) Störungszonen und Gesteinsinhomogenitäten ausgerichtet. Standorterkundungen im Kristallin umfassen demzufolge umfangreiche Untersuchungen zur hydraulischen Charakterisierung der Wirtsgesteinsformation (inklusive Störungszonen). In Tongesteinen sind umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen zu den Barriereigenschaften im Streckennahbereich und zu den Transporteigenschaften erforderlich. Bei Standorten in Salinarformationen beschränken sich die hydrogeologischen Studien im Wesentlichen auf das Deck- und Nebengebirge und nur in vergleichsweise geringem Umfang werden hydraulische Messungen in den salinaren Wirtsgesteinen selbst durchgeführt. Wichtig ist darüber hinaus z. B. die Bestimmung der räumlichen Verteilung unterschiedlicher Salinarschichten, d. h. die Analyse des internen Baustils.

Erkundungsziele und spezielle Untersuchungsmethoden für Steinsalz

Im Ergebnis der untertägigen Erkundung eines HAW-Endlagerstandortes in Salinargesteinen müssen detaillierte Informationen zur räumlichen Verbreitung von annähernd homogenen Steinsalzpartien und von nicht für die Endlagerung geeigneten bzw. von für die Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers besonders relevanten anhydritischen und Kalisalzschichten vorliegen [Bornemann et al. 2008]. Dies erfordert eine gezielte Ergänzung der aus den übertägigen Erkundungsarbeiten bereits vorhandenen Kenntnisse zum geologischen Bau und zur Zusammensetzung (Lagerungsverhältnisse, Petrographie, Stratigraphie und Mineralogie/Geochemie) der salinaren Schichten. Außerdem stehen Bestimmungen der felsdynamischen, thermomechanischen und geohydraulischen In-situ-Eigenschaften der für die HAW-Einlagerung vorgesehenen Bereiche des Salzstockes im Mittelpunkt (Tabelle 4-22).

Tabelle 4-22: Untersuchungsziele der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten im Steinsalz

Internbau der Salzstruktur (genaue räumliche Verteilung und Mächtigkeit der Salinarschichten, die im Hinblick auf die Begrenzung endlagergeeigneter z2-Hauptsalzbereiche wichtig sind, wie z. B. z2SF und z3HA; struktureller Bau wie z. B. Lage von Synklinalen/Antiklinalen, Abgrenzung von Homogenbereichen)
geomechanische und wärmephysikalische In-situ-Eigenschaften der Salzgesteine
Lokalisierung und Charakterisierung von Bereichen mit Mineralumwandlungen sowie von eingeschlossenen Lösungen, Gasen und Kondensaten
Stoffbestand der Salzbarriere (insbesondere Wassergehalte sowie physikalische Kenngrößen, Chemismus und isotopengeochemische Zusammensetzung von Lösungs- und Kohlenwasserstoff-Vorkommen in den Salinarschichten)

Bei der Analyse des Internbaus von Salzstrukturen kommen insbesondere lithologisch-petrographische, feinstratigraphische, mineralogisch-geochemische und strukturelle geologische Untersuchungsverfahren zum Einsatz. Für die geologische Erkundung der Internstrukturen werden neben Bohrungen und Strecken vor allem elektromagnetische Impulsreflexionsverfahren (EMR-Messungen) eingesetzt. Die per EMR nachgewiesenen Reflektoren (langzeitsicherheitsrelevante Anhydrit- und Kalisalz-führende Schichten) sind äußerst nützliche Hilfsmittel zur Konstruktion des Internbaus komplexer Salzstrukturen (Abbildung 4-9).

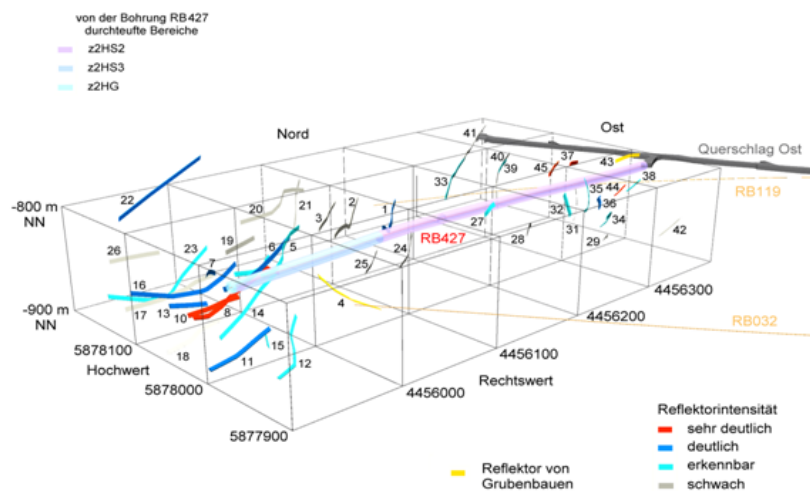


Abbildung 4-9: Beispiel für die Anwendung von EMR-Messungen im Wirtsgestein Salz zum Nachweis von lithologischen Grenzflächen und Grubenbauten (Quelle BGR)

Zur Untersuchung der hydraulischen Integrität des Salzgebirges und der mechanischen Stabilität von untertägigen Hohlräumen werden häufig mikroakustische Messungen eingesetzt. Die Mikrorissbildung kann mittels Erfassung von hochfrequenter seismischer Energie direkt nachgewiesen und geortet werden (Abbildung 4-10), wodurch Auflockerungszonen im Umfeld von Abbauen und an Schichtgrenzen nachgewiesen werden können [Kaiser et al. 2007]. Weitere Anwendungsmöglichkeiten für mikroakustische Messungen sind Beobachtungen der Gebirgsbelastung während der Verfüllung von Hohlräumen, z. B. aufgrund der Erwärmung

bei der Verfüllung mit Salzbeton, sowie der Nachweis der Wirksamkeit von Verfüllmaßnahmen anhand der Reduzierung der Rissbildungen im Gebirge.

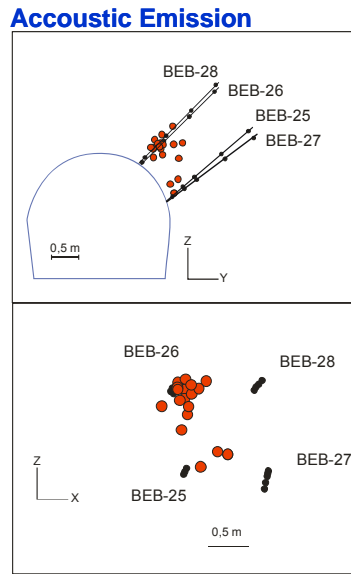


Abbildung 4-10: Beispiel für die Anwendung mikroakustischer Messungen zur Lokalisierung von Mikroriss-Bildungsprozessen im Umfeld einer Strecke im Wirtsgestein Salz (rote Punkte – registrierte akustische Signale, schwarze Punkte – Position der Messeinrichtungen in den Bohrungen; Quelle BGR)

Vereinzelte vorkommende Lösungszutritte ([BfS 2002], [Schramm et al. 2009]) sowie fluid inclusions werden umfangreich hydrochemisch und isotopengeochemisch untersucht, um ihre intrasalinare Herkunft zu belegen und nachzuweisen, dass die hydraulische Integrität der Salzstruktur gewährleistet ist.

Zur Analyse der komplizierten Wechselwirkungsprozesse zwischen den in einem HAW-Endlager ablaufenden THM-Prozessen wurden im Salz zahlreiche gekoppelte bzw. komplexe Experimente durchgeführt (ausführlicher siehe [Hammer & Sönke 2009]). Ergänzend werden mit den Daten aus Labor- und In-situ-Untersuchungen umfangreiche numerische Berechnungen zum Deformationsverhalten von Steinsalz und zur Standsicherheit untertägiger Hohlräume im Steinsalz durchgeführt. Als Beispiel wird auf die untertägige Erkundung des Salzstockes Gorleben verwiesen ([Hund et al. 1991], [Stier-Friedland et al. 1997], [Bornemann et al. 2008], [Bräuer et al., in Vorb.]).

Erkundungsziele und spezielle Untersuchungsmethoden für Tongesteine

Tongesteine reagieren sehr sensitiv auf physikalische (mechanische), hydraulische, chemische und thermische Einflüsse, die auf die bergmännischen Auffahrungen und andere endlagerspezifische Prozesse zurückzuführen sind. Zum Nachweis der Langzeitsicherheit müssen deshalb insbesondere Änderungen der Zusammensetzung und der Eigenschaften der Gesteine hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Standsicherheit des Grubengebäudes und die Barriere- bzw. Transporteigenschaften des Gebirges analysiert werden. Die Untersuchungen schließen auffahrungsbedingte Einflüsse (Auflockerungszone um Strecken, Abbildung 4-11), die Wechselwirkung der Wirtsgesteine mit den Materialien, die für den Gru-

benausbau benötigt werden, sowie mit den geotechnischen Barrieren und Endlagerbehältern ein. Darüber hinaus werden konzeptbezogene Studien zur Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren unter In-situ-Bedingungen durchgeführt.

Zusammengefasst ergeben sich die in Tabelle 4-23 aufgeführten Untersuchungsschwerpunkte, die detailliert in [Hammer & Sönnke 2009] beschrieben werden.

Tabelle 4-23: Erkundungsziele der untertägigen Standortuntersuchungen in Tongesteinen

Analyse der lithologischen und mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung, Diagenese/Metamorphose sowie der hydraulischen, geochemischen und mechanischen Eigenschaften der Tonsteine
Untersuchung der tonmineralogischen Zusammensetzung der Tonfraktion und des Schadstoffrückhaltevermögens (z. B. Kationenaustauschkapazität) der Gesteine
Untersuchungen zum Vorkommen und zur geochemischen Zusammensetzung der Porenwässer sowie primärer Lösungs- und Gasreservoirs
Analyse der Diffusions- und Retentionseigenschaften der Gesteine sowie der Transporteigenschaften für Radionuklide
Charakterisierung der Auflockerungszone im Streckennahbereich (EDZ) und ihrer Auswirkungen auf die Gebirgseigenschaften und Barrierewirkung
Untersuchung von Wechselwirkungen der Wirtsgesteine mit den eingebrachten Materialien (Korrosion, Gasentwicklung)
In-Situ-Tests von Endlagerkonzepten und Einlagerungstechnik
Untersuchung von gekoppelten, endlagerrelevanten Prozessen (THMC)

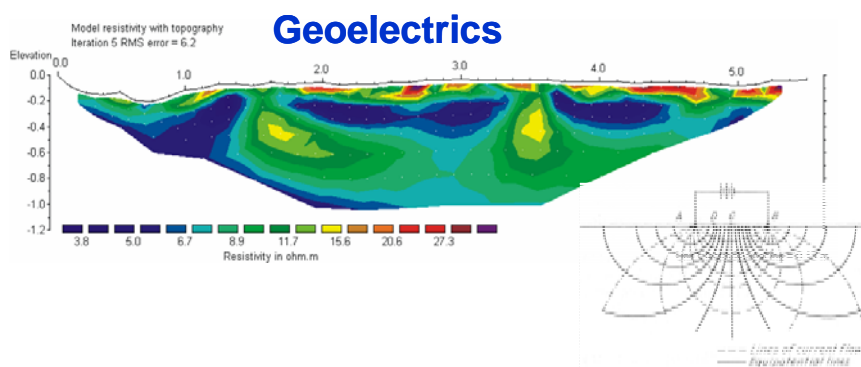


Abbildung 4-11: Beispiel für die Anwendung geoelektrischer Messungen zur Analyse der EDZ (URL Mont Terri, Quelle BGR)

Die komplexen Gesteins- und Gebirgseigenschaften von Tongesteinen erfordern deutlich aufwändigere untertägige Standortuntersuchungen als im Steinsalz oder im Kristallin. Für die Analyse des Gebirgsverhaltens ist es nicht ausreichend, die geologischen, mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und die Einflussfaktoren auf die endlagerrelevanten Prozesse losgelöst voneinander zu untersuchen. Bei der Einschätzung der Langzeitsicherheit von Endlagern in Tonsteinen führt nur die komplexe

Auswertung aller, zu dieser Fragestellung durchgeführten Experimente zum Ergebnis. Deshalb sind komplexe Untersuchungen der thermo-hydro-mechanisch-chemischen Prozesse (THMC) von besonderer Bedeutung (siehe z. B. [Wieczorek et al. 2007]). Beispiele für die dazu erforderliche Synthese verschiedener interdisziplinärer Untersuchungsmethoden sind in [Hammer & Sönneke 2009] zusammengefasst.

Umfangreiche und detaillierte untertägige Erkundungen von Tongesteinen erfolgen im Felslabor Mont Terri in der Schweiz und im URL Meuse/Haute Marne im Ostteil des Pariser Beckens.

Erkundungsziele und spezielle Untersuchungsmethoden für kristalline Gesteine

Ausgehend von den in Skandinavien, Kanada und in der Schweiz durchgeführten untertägigen Standorterkundungsarbeiten im Kristallin konzentrieren sich die Arbeiten auf strukturgeologisch-hydrogeologische Untersuchungen sowie auf gebirgsmechanische In-situ-Studien (Tabelle 4-24).

Tabelle 4-24: Untersuchungsziele bei der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten in kristallinen Gesteinen

detaillierte Angaben zu den geochemisch-mineralogischen, physikomechanischen, wärmephysikalischen, Filtrations-, Diffusions- und Sorptions- bzw. Retardationseigenschaften der Wirtsgesteine (z. B. Gehalte von Kolloiden und Komplexbildnern)
detaillierte Informationen zur räumlichen Verteilung von Gesteinen mit unterschiedlichen endlagerrelevanten Eigenschaften (z. B. Anisotropie in der Wärmeleitfähigkeit und in der hydraulischen Durchlässigkeit)
Abgrenzung von möglichst ungeklüfteten homogenen Gebirgsbereichen
umfassende strukturgeologische Charakterisierung des Wirtsgesteins (räumliche Orientierung, Teufenerstreckung und Vernetzung von Kluft- und Störungssystemen, Eigenschaften der Kluft- und Störungssysteme)
In-situ-Untersuchungen zu den hydrogeologischen Standortbedingungen, hydraulische Eigenschaften der Gesteine und der Kluft- und Störungssysteme im geplanten Einlagerungsbereich bzw. im Nahfeld des Endlagers
geochemisch-isotopengeochemische Angaben zu den bei der Erkundung festgestellten Wasserzuflüssen; Daten zur Herkunft und zum Alter der Grundwässer
Informationen zu aktuellen und zukünftigen Spannungsverteilungen innerhalb des Gesteinsmassivs, zur Änderung des Spannungsfeldes mit der Teufe; Abschätzung von Senkungs- bzw. Hebungsgeschwindigkeiten einzelner Gesteinsblöcke im Umfeld von Störungszonen, die den Endlagerbereich queren
Untersuchungen der Auflockerungszone im Streckennahbereich (EDZ)
Untersuchungen zur Wechselwirkung von eingebrachten Materialien (Endlagerbehälter, Streckenausbau, Verschlussmaterialien) mit dem Gebirge
Untersuchungen zur Wirkung und zu den Eigenschaften geotechnischer Barrieren

Einen breiten Raum nehmen In-situ-Untersuchungen bzw. Experimente zum besseren Verständnis der hydraulischen, geochemischen und physikalischen Transportphänomene von

Radionukliden im Grundwasser sowie detaillierte Studien der Nahfeldprozesse und darauf basierende Sicherheits- und Risikoanalysen ein. Außerdem erfolgen Untersuchungen zum Einfluss tektonischer Prozesse und thermischer Einwirkungen auf die Eigenschaften der Wirtsgesteine sowie zur Wirksamkeit der technischen bzw. geotechnischen Barrieren und zum Zusammenwirken der verschiedenen Barrieren (z. B. Gasmigration, Retardation).

Zur Analyse der genannten Eigenschaften werden im Verlaufe der untertägigen Standorterkundungsarbeiten vor allem geologische Kartierungen der bergmännischen Auffahrungen und Bohrungen, bohrlochgeophysikalische, teilweise tomographische Messungen sowie hydrogeologische und gebirgsmechanische Untersuchungen durchgeführt (siehe z. B. [ANDRA 2005b], [SKB 2008], [Hammer & Sönne 2009]).

Schwerpunkt der geologischen Kartierung ist die Aufnahme und Charakterisierung tektonischer Strukturen (Klüfte und Störungen) sowie die Erfassung petrographischer Gesteinsmerkmale. Darüber hinaus erfolgt eine felsmechanische Charakterisierung der Gesteine (Dokumentation der Stöße bezüglich Kluftabstände, -häufigkeit, -öffnungsweite, RQD-Index, etc.) sowie eine hydrogeologische Kartierung (Stoßfeuchtigkeit, Tropfstellen, wasserführende Klüfte), die auch eine hydrochemische Probenahme beinhaltet. Neben dem geologischen Standortmodell wird aus diesen Daten auch ein Kluftmodell unter Berücksichtigung geostatistischer Methoden erarbeitet.

Die geophysikalischen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Erkundung von Kluftsystemen im Nah- und Fernfeld. Hierfür werden Radarmessungen in Form von Reflexionsseismik in verschiedenen Maßstäben von mehreren hundert Metern bis zum Meterbereich eingesetzt. Die Messungen erfolgen entlang von Strecken und in Bohrungen, z. T. als Tomographie. Zur Nahfelderkundung werden auch Ultraschallmessungen und geoelektrische Verfahren eingesetzt.

Erfahrungen bei der Erkundung des potenziellen Endlagerstandortes Olkiluoto [Posiva 2005] und im URL Grimsel [Pahl et al. 1989] belegen das häufige Vorkommen von deutlichen geomechanischen Anisotropien in kristallinen Gesteinen, gepaart mit stark mit der Teufe oder der Nähe zu mächtigen Störungszonen variierenden Gebirgsspannungsbeträgen. Der Spannungszustand kristalliner Gesteine wird unter In-situ-Bedingungen mittels Hydrofracturing, Überbohrversuchen oder Packerabdrücktests bestimmt. Parallel dazu erfolgen In-situ-Messungen des untertägigen Deformations- bzw. Ausbruchverhaltens der Gesteine mittels Konvergenz-, Extensometer- und Fissurometer-Messeinrichtungen.

Als Beispiele für komplexe und detaillierte untertägige Standorterkundungen in kristallinen Gesteinen können die Untersuchungen im Felslabor Grimsel (Schweiz), im Felslabor Stripa (Schweden), im URL Whiteshell (Kanada) sowie in den URL's Äspö (Schweden) und ONKALO (Finnland) dienen (siehe [Hammer & Sönne 2009]).

Weitere Einzelheiten zur Standortauswahl und -erkundung sind im Anhang 3 zu diesem Bericht ausführlich beschrieben.

5 Technische Konzepte für HAW-Endlager

Technisch fortgeschrittene Konzepte für HAW-Endlager gibt es für kristalline Wirtsgesteine in Schweden, Finnland sowie für Ton/Tonstein in Belgien, Frankreich und in der Schweiz und für Salz in Deutschland. Grundlagen für die Planung des Endlagerbergwerkes sind das im jeweiligen Land ausgewählte, respektive verfügbare Wirtsgestein, die Art und Menge der endzulagernden Abfälle, das gewählte Einlagerungskonzept und die Ergebnisse bzw. Forderungen, die sich aus dem Langzeitsicherheitsnachweis ergeben. Insbesondere die thermo-hydro-mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und die Konzepte zum Transport und zur Einlagerung von Endlagerbehältern beeinflussen maßgeblich die Dimension des Endlagerbergwerkes. Nachfolgend werden die in diesen Ländern entwickelten Endlagerkonzepte zusammenfassend dargestellt.

5.1 HAW-Endlager in Kristallingestein

Kristallingestein (vorwiegend Granitgneis) ist in Schweden und Finnland aufgrund der geologischen Verhältnisse auf dem skandinavischen Schild die bevorzugte Wirtsgesteinsformation. Da in diesem Wirtsgestein mit Wasserzutritten zu rechnen ist, sind die technischen und geotechnischen Barrieren für die langfristige Isolation der radioaktiven Stoffe von besonderer Bedeutung.

5.1.1 Schweden

Im schwedischen Endlagerkonzept werden ausschließlich ausgediente Brennelemente (BE) berücksichtigt; eine Wiederaufarbeitung ist grundsätzlich nicht vorgesehen. Die Gesamtmenge an ausgedienten Brennelementen von den DWR- und BWR-Kernkraftwerken wird bei einer angenommenen Betriebszeit von 40 Jahren auf 9300 tSM, entsprechend 45.000 ausgediente Brennelemente abgeschätzt [SKB 2001]. Der für ausgediente Brennelemente entwickelte Endlagerbehälter ist als Doppelbehälter ausgelegt. Der innere Behälter aus Stahl soll die mechanische Stabilität sichern, der äußere Kupferbehälter die chemische. Die Behälterstandzeit (Lebensdauer) soll 100.000 Jahre betragen. Zwei Varianten des Endlagerbehälters mit unterschiedlicher Wandstärke des Kupferbehälters werden erwogen (Abbildung 5-1).

Für das schwedische Referenzendlagerkonzept KBS-3V (vertikale Einlagerung von einzelnen Endlagerbehältern in vertikale Bohrlöcher von der Sohle einer Einlagerungsstrecke aus) wurde die Variante mit einem Kupferbehälter mit einer Wandstärke von 50 mm ausgewählt. In einem BE-Endlagerbehälter können entweder 4 DWR-BE oder 12 SWR-BE eingelagert werden. Die Temperatur an der Oberfläche der Behälter soll im Endlager 100 °C nicht überschreiten [SKB 2001], um die geotechnische Barriere aus Bentonit nicht zu beeinträchtigen.



Abbildung 5-1: Schweden – Varianten von kupferummantelten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente [SKB 2001]

Das Konzept (Abbildung 5-2) sieht vor, dass in den Boden der Einlagerungsstrecke im Abstand von ca. 6 m vertikale Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 1,75 m niedergebracht werden. Als geotechnische Barriere werden Bentonitringe bzw. -blöcke in das Bohrloch eingebracht, die bei Zutritt von Wässern quellen und dadurch den Endlagerbehälter vor Korrosion schützen sollen. In den verbleibenden Hohlraum werden dann die Endlagerbehälter eingesetzt. Nach dem Einsetzen wird der Endlagerbehälter mit Bentonitblöcken abgedeckt und der Resthohlraum des Bohrloches verfüllt. Die Bentonitringe und -blöcke mit einer Höhe von 50 cm und einem äußeren Durchmesser von 165 cm werden vorgefertigt.

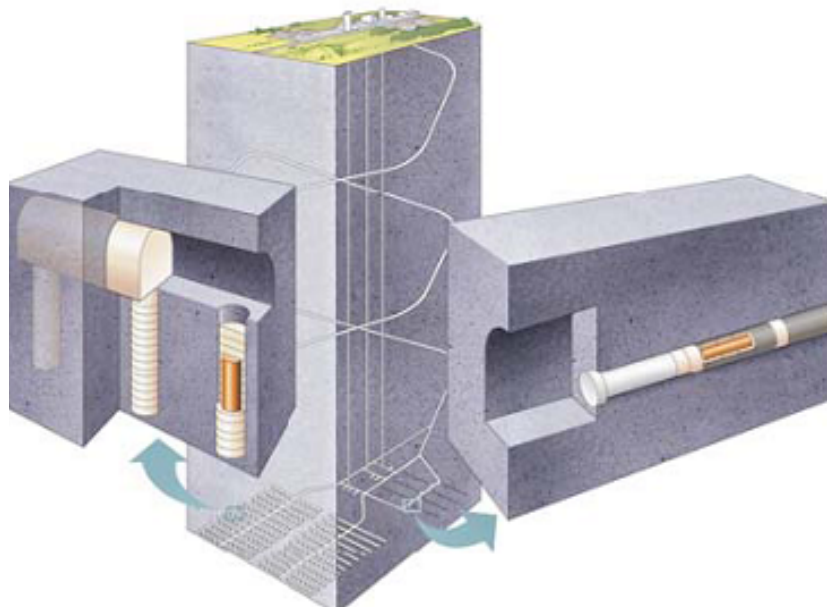


Abbildung 5-2: Schwedisches Endlagerkonzept KBS-3, mit Einlagerung von Endlagerbehältern in vertikale Bohrlöcher (Referenzkonzept: KBS-3V) und Einlagerung in horizontalen Strecken (alternativ: KBS-3H) [SKB 2001]

Das Einsetzen der Endlagerbehälter in die Bohrlöcher erfolgt mit einer Einlagerungsmaschine, von der ein Muster gefertigt und getestet wurde (s. Abbildung 5-3). Die Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik sieht eine mobile, nicht gleisgebundene Einlagerungsmaschine vor. Auch davon wurde ein Prototyp gebaut und getestet (Abbildung 5-4).

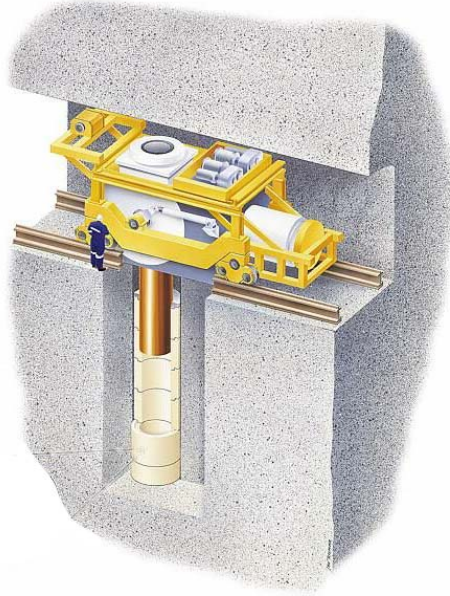


Abbildung 5-3: Schweden – Prinzipskizze einer Maschine zur Einlagerung von Endlagerbehältern in vertikale Bohrlöcher (KBS-3V-Konzept) [SKB 2001]

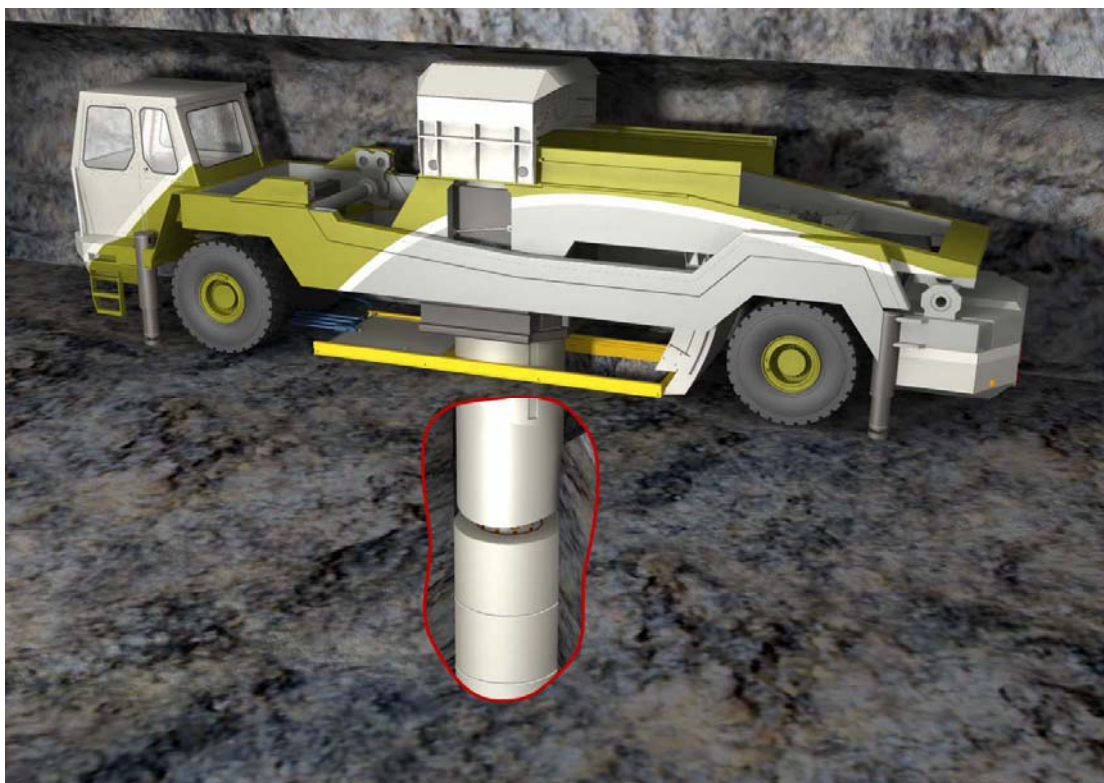


Abbildung 5-4: Schweden – Skizze einer mobilen Einlagerungsmaschine (Weiterentwicklung KBS-3V-Konzept) [SKB 2007]

Als Alternative zum Referenzkonzept wurde die Einlagerung von Endlagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H), das sogenannte Supercontainer-Konzept, entwickelt. Ein Supercontainer beinhaltet einen kupferummantelten Endlagerbehälter gemäß Referenzkonzept und eine diesen umhüllende Schicht aus vorgefertigten Bentonitringen. Die Außenhülle des Supercontainers besteht aus perforiertem Stahlblech, damit zutretende Wässer an die quellfähige Bentonitbarriere gelangen können. Der Supercontainer soll in ca. 300 m lange horizontale Bohrungen des Endlagers eingebracht werden (s. Abbildung 5-5). Zwischen den Supercontainern werden aus thermischen Gründen Distanzblöcke eingesetzt.

Für diese Konzeption wurden Untersuchungen zur Rückholbarkeit durchgeführt [Pettersson 2006a].

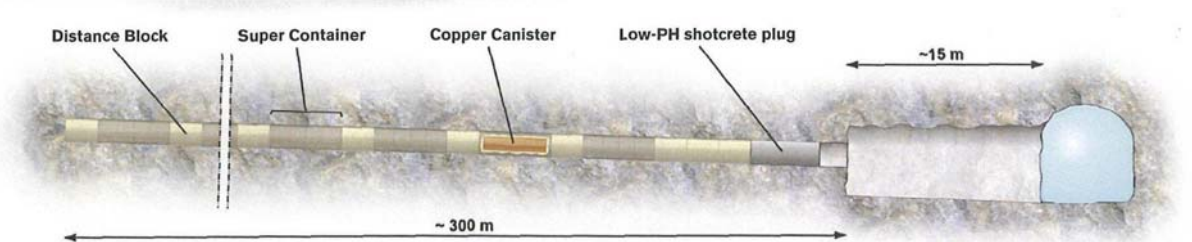


Abbildung 5-5: Schweden – Alternative zum Referenzkonzept: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) [Pettersson 2006b].

Der Zugang zum Endlager von über Tage erfolgt über eine Rampe. Es sind zusätzlich vier Schächte vorgesehen; ein Förderschacht und zwei Frischwetterschächte im Zentralteil des Endlagers sowie ein Wetterauszugsschacht am entferntesten Ende des Endlagers [Pettersson & Widing 2003]. Die Länge der Einlagerungsstrecken für die vertikale Bohrlagerung wurde bei den Machbarkeitsuntersuchungen auf 265 m festgelegt. Eine Präzisierung der Länge soll bei dem Auffahren entsprechend den angetroffenen geologischen Bedingungen erfolgen. Der Streckenabstand beträgt ca. 40 m. Insgesamt sind über 100 Einlagerungsstrecken aufzufahren. In jeder Strecke sollen ca. 40 Bohrlöcher niedergebracht werden. Abbildung 5-6 zeigt das prinzipielle Layout des gesamten Endlagers.

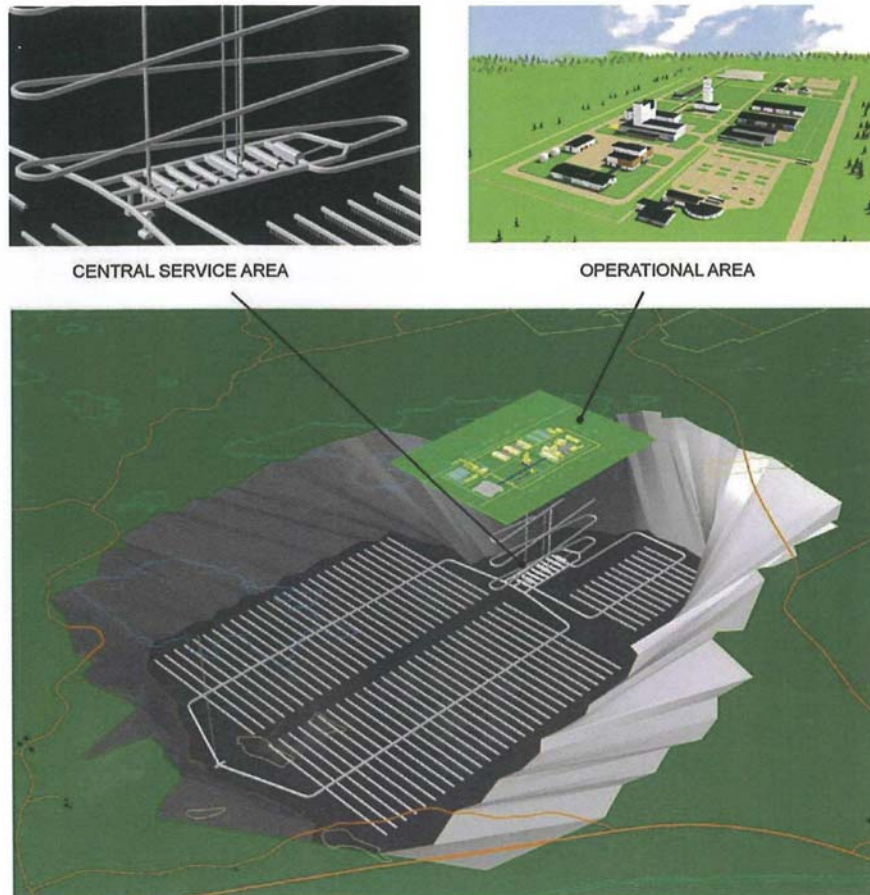


Abbildung 5-6: Schweden – Prinzipielle Darstellung des Gesamtlagers mit übertägigen Anlagen und untertägigem Strecken- und Hohlräumensystem [Pettersson & Widing 2003]

Das endgültige Endlagerkonzept soll in Abhängigkeit von den Ergebnissen laufender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten festgelegt werden. SKB legt dazu der Genehmigungsbehörde SKI alle drei Jahre ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die Endlagerung vor. Die wesentlichsten Forschungseinrichtungen der SKB sind das Untertagelabor in Äspö und das Behälterlabor in Oskarshamn. Die Untersuchungen zum Endlagerkonzept konzentrieren sich insbesondere auf die Bewertung der Barrierenwirkung sowie die Wechselwirkung der technischen und natürlichen Barrieren.

Im URL Äspö werden u. a. umfangreiche Arbeiten zur Erkundung der geomechanischen Gesteinseigenschaften, zur Homogenität größerer Gebirgsbereiche, zur Klüftigkeit des Granitgneises und zur Auflockerung des Gebirges im Bereich neu aufgefahrener Strecken durchgeführt. Des Weiteren werden Versuche zur Erprobung der Einlagerungstechnik sowie zum Bentonit als Puffer- und Verfüllmaterial durchgeführt. Im Behälterlabor Oskarshamn werden Verfahren zum Verschweißen der Kupferbehälter, Technologien für das Beladen der Behälter mit Brennelementen u. a. untersucht.

Die Inbetriebnahme des Endlagers soll mit Versuchseinlagerungen beginnen und 2023 mit dem regulären Endlagerbetrieb fortgesetzt werden. Die abschließende Entscheidung für den Endlagerstandort Forsmark wurde im Herbst 2009 gefällt.

5.1.2 Finnland

In intensiver und langjähriger Kooperation mit der schwedischen Endlagerorganisation SKB hat die finnische Endlagerorganisation Posiva Oy die Grundlagen für das finnische Endlagerkonzept, das dem schwedischen sehr ähnlich ist, erarbeitet. Eine Wiederaufarbeitung von ausgedienten Brennelementen ist wie in Schweden nicht vorgesehen. Die ausgedienten Brennelemente sollen direkt endgelagert werden. Bis 2070 wird ein Gesamtinventar an ausgedienten Brennelementen erwartet, das einer Masse von 5530 tSM entspricht. Entsprechend der Grundstrategie für die Errichtung des Endlagers nach dem schwedischen KSB-3-Konzept sind für die Endlagerung der ausgedienten Brennelemente auch in Finnland kupferummantelte Doppelbehälter vorgesehen. Für das erwartete Gesamtinventar werden ca. 2840 Endlagerbehälter benötigt. Versuchsmuster der Endlagerbehälter wurden gefertigt und getestet. Abbildung 5-7 zeigt Ausschnitte aus der Fertigung und Montage des äußeren Kupferbehälters und des inneren Stahlbehälters mit entsprechenden Fächern für die ausgedienten Brennelemente. Der Deckel des inneren Stahlbehälters wird verschraubt, der des äußeren Kupferbehälters verschweißt.

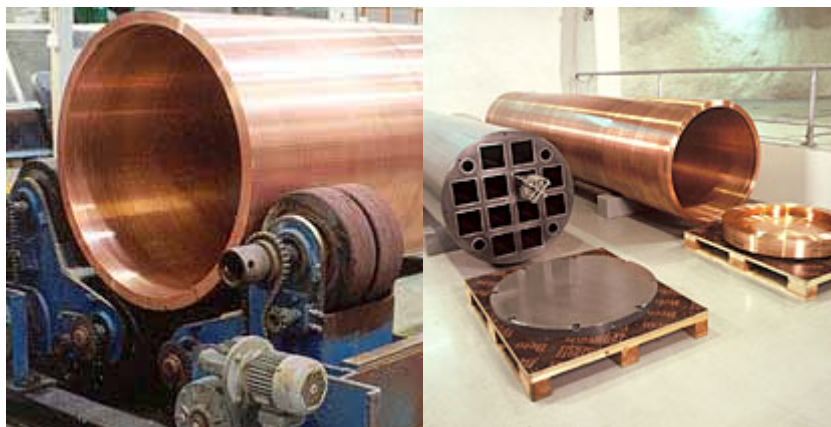


Abbildung 5-7: Finnland – Fotos von der Fertigung von Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente [Posiva]

In Finnland ist wie in Schweden die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in einer Granitgneisformation vorgesehen. Das Referenzendlagerkonzept entspricht dem schwedischen KBS-3V-Konzept (s. Abbildung 5-8), das aus den nachfolgenden Varianten ausgewählt wurde:

- Vertikale Einlagerung von einem oder mehreren Endlagerbehältern in einem Bohrloch (KBS-3V)
- Horizontale Einlagerung von je einem Endlagerbehälter in einer horizontalen Bohrung (KBS-3H)

- Horizontale Einlagerung von mehreren Endlagerbehältern hintereinander in mittellangen horizontalen Bohrlöchern (KBS-3MLH).

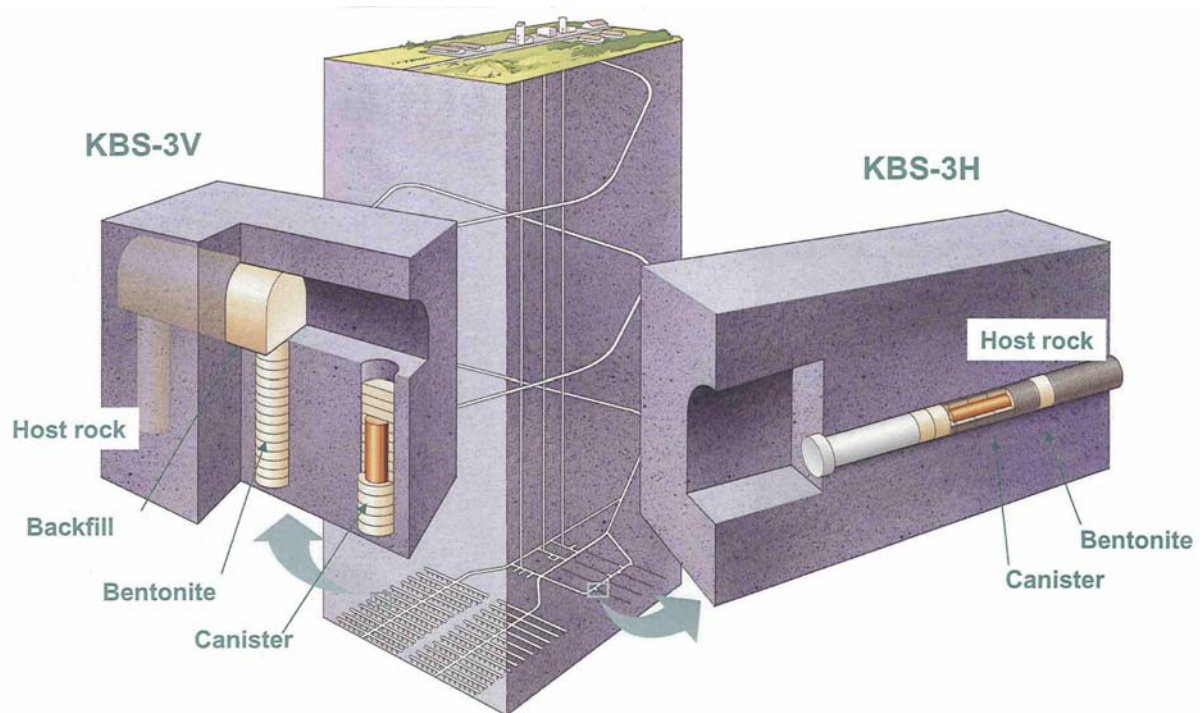


Abbildung 5-8: Finnland – Referenzendlagerkonzept KBS-3V (links) und die Variante (KBS-3H) zur Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in horizontale Bohrlöcher [Posiva 2006]

Als wesentliche Kriterien für die Auslegung des Endlagers werden gemäß [Posiva 2006] die Lebensdauer der Endlagerbehälter unter den im Endlager zu erwartenden Bedingungen von mindestens 100.000 Jahren und deren mechanische Integrität bei einem Druck von max. 30 MPa (Annahme: 3 km Eisschicht) angesetzt. Die Konstruktion und Standfestigkeit der Behälter müssen eine Rückholung der Behälter aus dem Endlager gestatten, wenn dies als notwendig oder zweckmäßig erachtet wird. Wie im schwedischen Konzept darf wegen des Verfüllmaterials Bentonit die max. Temperatur im Endlager 100 °C nicht überschreiten.

Wie beim vergleichbaren schwedischen KBS-3V-Konzept soll die Einlagerung der Endlagerbehälter über eine speziell dafür entwickelte Einlagerungsmaschine (Abbildung 5-9) erfolgen.

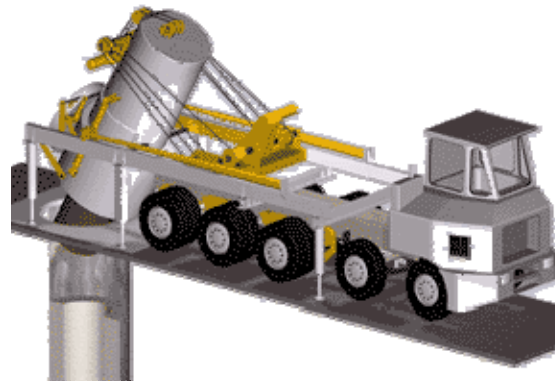


Abbildung 5-9: Finnland – Einlagerungsmaschine für BE-Behälter [STUK]

Das Endlagerbergwerk soll in Olkiluoto in einer Teufe von 420 m errichtet werden. In einer Variante dazu wird eine zusätzliche zweite Einlagerungssohle in ca. 500 m betrachtet. Das gesamte Endlager besteht aus einem System von Transport- und Einlagerungsstrecken, das über eine Rampe von der Erdoberfläche zugänglich ist. Darüber hinaus sind drei Schächte vorgesehen – ein Schacht für den Behältertransport, ein Schacht für Personentransport und ein Wetterschacht [Posiva 2006]. Der Wetterschacht soll einen Durchmesser von 3,5 m und der Personenbeförderungsschacht von 4,5 m haben. In Abbildung 5-10 ist das gesamte Endlager schematisch dargestellt.

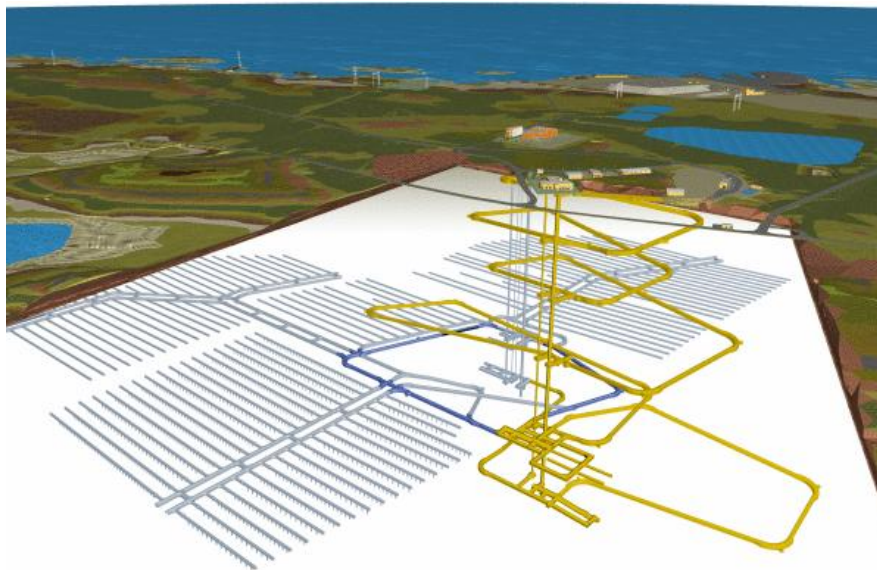


Abbildung 5-10: Finnland – Prinzipielle Darstellung des gesamten Endlagers Olkiluoto mit den überörtigen Anlagen und dem Strecken- und Hohlräumssystem [Posiva 2006]

Die Dimensionen der Transport- und Einlagerungsstrecken sowie der Einlagerungsbohrlöcher sind ähnlich wie im schwedischen KBS-3V gewählt. Die Gesamtlänge der Einlagerungsstrecken soll ca. 41 km betragen. Das Gesamtvolumen der Einlagerungsstrecken mit den Einlagerungsbohrungen wird auf ca. 630.000 m³ und das Gesamtvolumen des Endlagers auf ca. 1,3 Mill. m³ abgeschätzt [Ikonen 2003].

Nach der Entscheidung durch das Parlament in 2001 für den Standort Olkiluoto wurde dort mit der Errichtung einer „underground rock characterization facility“ namens ONKALO begonnen. Dieses Untertagelabor soll bei entsprechender Eignung in das Endlager überführt werden. Die Inbetriebnahme des Endlagers soll mit einer Versuchseinlagerung beginnen und mit dem regulären Endlagerbetrieb 2020 fortgesetzt werden.

Eine Übertragung des schwedischen oder finnischen Endlagerkonzeptes auf deutsche Bedingungen wäre prinzipiell denkbar. Da nach Aussagen der BGR [BGR 2004] in Deutschland Kristallinformationen mit hinreichenden Endlagereigenschaften nicht in ausreichender Größe vorkommen, wird ein solches Endlagerkonzept jedoch nicht weiter verfolgt.

5.2 HAW-Endlager in Tongestein

Belgien, Frankreich und die Schweiz haben sich für ein HAW-Endlager in Tongesteinen entschieden. Während in Frankreich und in der Schweiz Tonstein als Wirtsgestein zur Verfügung steht, wird in Belgien der sogenannte Boom-Clay, ein plastischer Ton, auf seine Eignung untersucht. Da in Tongesteinsformationen der Zutritt von Grundwasser in die Einlagerungsbereiche nicht auf Dauer ausgeschlossen werden kann, sind neben der geologischen Barriere Ton respektive Tonstein die technischen und geotechnischen Barrieren von großer Bedeutung. In den Konzepten der drei genannten Länder soll die Isolation der Abfälle vor eindringendem Wasser demzufolge hauptsächlich durch Puffer- und Verfüllmaterialien aus quellfähigem Ton (Bentonit) erreicht werden. Hierbei ist die gleiche Temperaturrestriktion von 100 °C wie bei dem Bentoniteinsatz in Endlagerkonzepten in Kristallingestein zu berücksichtigen.

5.2.1 Belgien

Als Wirtsgesteinsformation für die Endlagerung hoch- und mittelaktiver sowie langlebiger radioaktiver Abfälle wurde in Belgien die tertiäre Boom-Tonformation ausgewählt. Beim sogenannten Boom-Clay handelt es sich um einen plastischen Ton, der einen massiven Ausbau für jeden darin zu erstellenden Hohlraum erfordert. Am Standort Mol-Dessel wird seit 1984 das Untertagelabor HADES (High-Acticity Disposal Experimental Site) für Untersuchungen zur Endlagerung im Boom-Clay betrieben.

Ende 1993 hat die belgische Regierung entschieden, dass sowohl die Endlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung als auch die direkte Endlagerung von ausgedientem Kernbrennstoff als gleichwertige Optionen für die Endlagerung zu betrachten sind [Dierick et al. 1998]. 1998 wurde von der belgischen Regierung ein Moratorium für die Fortführung der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff verhängt [Grupa et al. 2000]. Ausgehend von diesen Entscheidungen berücksichtigt das belgische Konzept für ein Endlager in Tongestein zwei Optionen der Kernbrennstoffstrategie [Grupa et al. 2000], [ONDRAF/NIRAS 2001]:

- Wiederaufarbeitung des gesamten anfallenden Kernbrennstoffes – Referenzszenarium

- Einstellung der Wiederaufarbeitung nach Auslaufen der derzeit geltenden Verträge mit der Cogema und direkte Endlagerung des übrigen ausgedienten Kernbrennstoffes

Nach grundlegender Überarbeitung bisheriger Konzepte wird seit 2003 in Belgien von der Endlagerorganisation ONDRAF/NIRAS ein Endlagerkonzept favorisiert, nach dem die Endlagerung der Wiederaufarbeitungsabfälle und der ausgedienten Brennelemente in sogenannten Supercontainern erfolgen soll [Bel et al. 2004]. Die Gesamtmenge des Kernbrennstoffes wird über die erwartete Betriebszeit aller Kernkraftwerke auf 4860 tSM eingeschätzt, zuzüglich 75 tSM aus MOX-Brennelementen. Daraus ergeben sich folgende endzulagernde Abfallmengen für die zwei Optionen:

- Referenzszenarium: Vollständige Wiederaufarbeitung der 4860 tSM:
 - 3920 Kokillen mit verglasten HAW – entsprechend 1960 Supercontainer
 - 75 tSM aus 144 ausgedienten MOX-Brennelementen – entsprechend 144 Supercontainer
- Direkte Endlagerung und Wiederaufbereitung der bereits vertraglich vereinbarten 670 tSM:
 - 670 tSM (420 Kokillen mit verglasten HAW) – entsprechend 210 Supercontainer
 - 4190 tSM aus ca. 10.000 ausgedienten Uran-Brennelementen – entsprechend ca. 2500 Supercontainer
 - 75 tSM aus 144 ausgedienten MOX-Brennelementen – entsprechend 144 Supercontainer.

ONDRAF/NIRAS hat das Konzept des Supercontainers als neues Referenz-Behälterkonzept für die Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen entwickelt. Ein Schnitt durch einen Supercontainer ist in Abbildung 5-11 gezeigt.

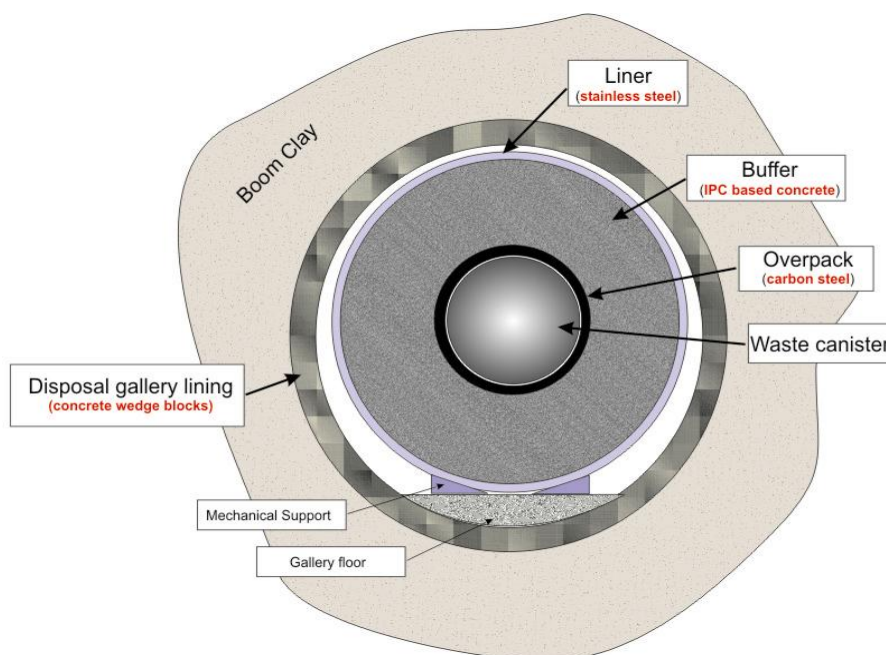


Abbildung 5-11: Belgien – Prinzipielle Darstellung eines Supercontainers (Schnitt durch Behälter in einer Einlagerungsstrecke) [Bel et al. 2004]

Die Auswahl dieses Konzeptes beruht auf einer Analyse verschiedener alternativer Auslegungsoptionen, die auf der Grundlage einer Reihe von Langzeitsicherheitskriterien sowie Machbarkeitskriterien bewertet wurden. Das Supercontainerkonzept sieht vor, die Abfälle in Overpacks aus unlegiertem Stahl mit einer Wandstärke von 30 mm zu verpacken und anschließend den Deckel des Overpacks zu verschweißen. In einen Overpack sollen jeweils zwei HAW-Kokillen, vier DWR-BE bzw. ein MOX-Brennelement verpackt werden. Jeweils ein Overpack mit Abfällen wird dann in einen Supercontainer verpackt. Der Strahlenschutz wird beim Supercontainer durch einen allseitigen ca. 600 bis 700 mm starken Zementbuffer aus anorganischem Phosphatzement und gewöhnlichem Portlandzement gewährleistet. Den Buffer umgibt ein Metallmantel mit einer Wandstärke von 6 mm, der die mechanische Stabilität gewährleisten und gleichzeitig als Gussform für das Zementmaterial dienen soll. Der geschlossene und mit Deckeln verschweißte Metallmantel soll auch das Buffermaterial vor einer Einwirkung von korrodierenden Substanzen im Boom-Ton schützen. Aus Überlegungen des Korrosionsschutzes wird der Einsatz von Austenitstahl dafür erwogen.

Aufgrund der plastischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sollen alle Einlagerungsstrecken mit massiven Stützelementen aus Betonfertigteilen ausgebaut werden. Die Einlagerungstechnik ist noch nicht abschließend geklärt. Zwei Varianten sind in der Diskussion; gleisgebundener Transport bis zum Einlagerungsort oder Transport mittels Luftkissentechologie. Nach der Einlagerung wird der verbleibende Hohlraum der Einlagerungsstrecke mit Beton vollständig verfüllt. Abbildung 5-12 zeigt einen Längsschnitt durch eine geplante Einlagerungsstrecke mit einem Supercontainer für ausgediente Brennelemente.

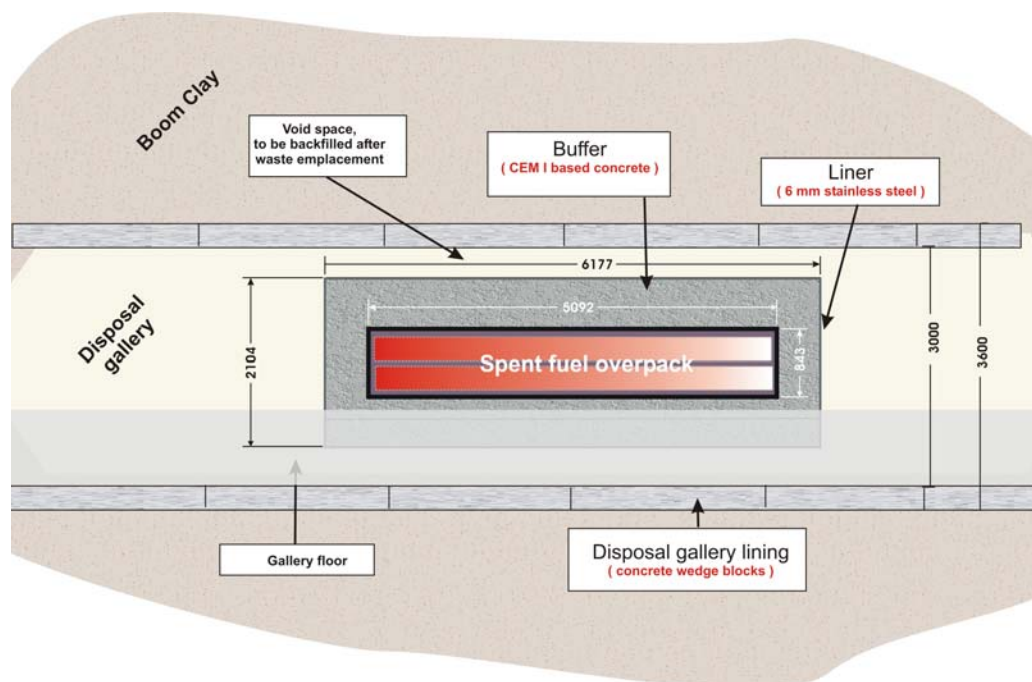


Abbildung 5-12: Belgisches Endlagerkonzept (Supercontainer); hier für ausgediente Brennelemente [Bel et al. 2004]

Das geplante Endlager (s. Abbildung 5-13) besteht aus einem Streckennetz in der Mitte der Boom-Ton-Formation in einer Teufe von ca. 230 m [ONDRAF/NIRAS 2001]. Darin ist die

Errichtung von drei Schächten vorgesehen (Auffahrungschacht, Gebindeförderschacht sowie Personen- und Wetterschacht), die in einem Abstand von ca. 400 m angeordnet sind [Bel et al. 2004]. Der Innendurchmesser der Schächte beträgt bis zu 10 m (Gebindeförderschacht). Untertage sind die Schächte an der Basis mit einer Verbindungsstrecke mit einem Durchmesser von 6 m verbunden. Die Verbindungsstrecke stellt gleichzeitig den Fluchtweg dar. Von der Verbindungsstrecke gehen die Einlagerungsstrecken ab. Die Einlagerungsstrecken können in Abhängigkeit von der Einlagerungstechnologie einen Durchmesser bis zu 4 m haben. Die Länge der Einlagerungsstrecken beträgt ca. 1.000 m.

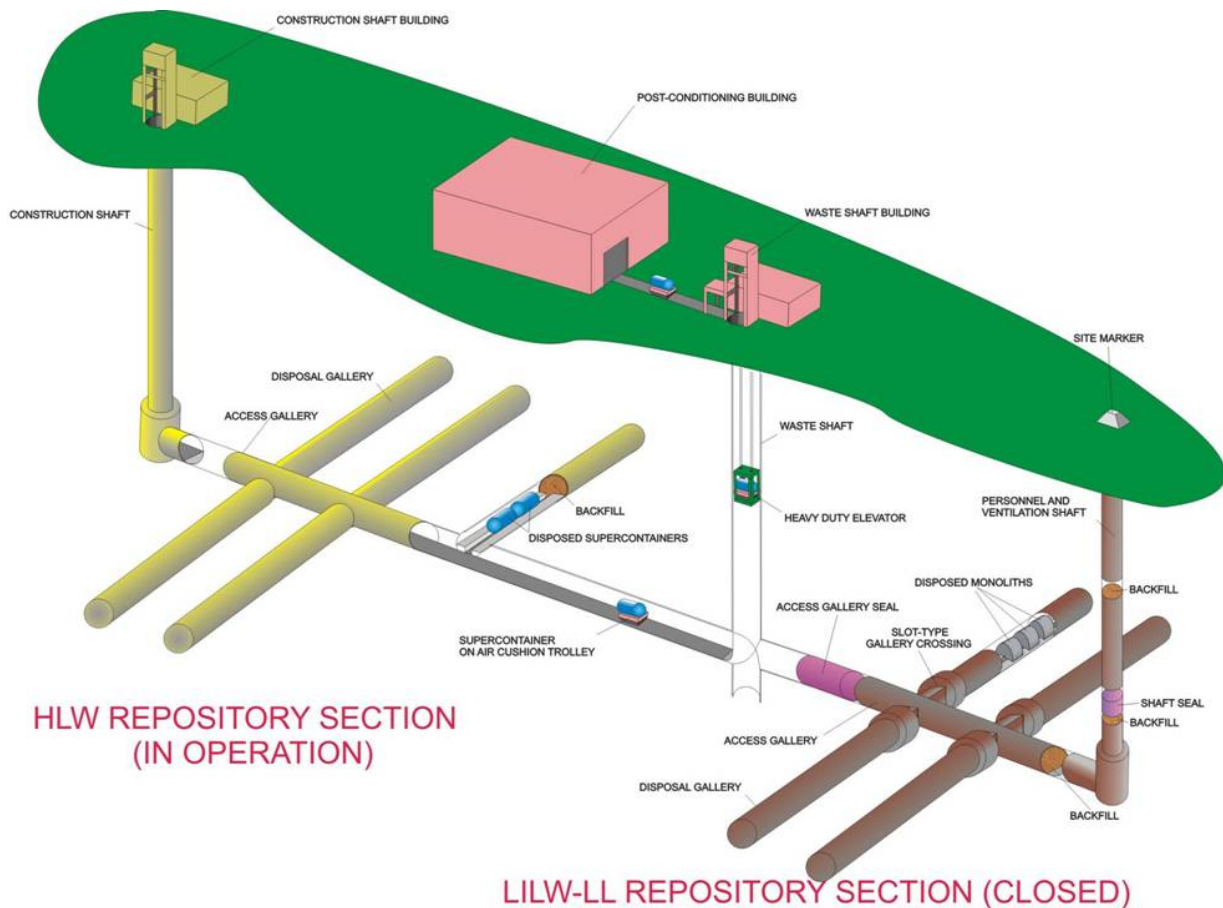


Abbildung 5-13: Belgien – Prinzipskizze vom belgischen Endlager für wärmeentwickelnde und langlebige radioaktive Abfälle [ONDRAF/NIRAS 2001]

Die Anordnung des Endlagers folgt der Neigung der Tonformation, die ca. 1 bis 2° beträgt. Die Auswahl der Durchmesser der Schächte und der Strecken erfolgte auf der Grundlage praktischer, technischer, ökonomischer und sicherheitsrelevanter Erwägungen. Eine entscheidende Voraussetzung für die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers ist die Einhaltung des festgelegten Temperaturkriteriums von 100 °C für das Verfüllmaterial bzw. die Wirtsgesteinsformation. Obwohl nicht gesetzlich festgelegt, soll eine Rückholbarkeit der Abfälle in jeder Phase des Bestehens des Endlagers berücksichtigt werden. Jedoch dürfen Maßnahmen, die eine Rückholung ermöglichen oder erleichtern, unter keinen Umständen die betriebliche und Langzeitsicherheit des Endlagers beeinträchtigen.

Da noch eine Vielzahl von Fragen zum belgischen HAW-Endlager zu klären sind (z. B. abschließende Bewertung des Boom-Clay als Wirtsgestein, Standortsuche und -auswahl, vorläufiger Sicherheitsbericht, etc.), ist eine Einschätzung zum frühesten Beginn des Einlagerungsbetriebes schwierig. ONDRAF/NIRAS nimmt an, dass etwa im Jahr 2035 am Ende einer 10jährigen Bauzeit mit der Einlagerung der ersten Endlagerbehälter begonnen werden kann.

5.2.2 Frankreich

Die französische Endlagerorganisation ANDRA hat gemäß [ANDRA 2005d] ein Mengengerüst für die einzulagernden Abfallströme an hochaktiven Abfällen für vier unterschiedliche Szenarien ermittelt, wobei eine Betriebszeit der KKW von 40 Jahren zu Grunde gelegt ist. Da das Programm der Direkten Endlagerung auf unbestimmte Zeit ausgesetzt wurde, kann von dem Szenarium der Wiederaufarbeitung des gesamten ausgedienten Kernbrennstoffes von den gegenwärtig bestehenden Kernkraftwerken ausgegangen werden. Demnach sind folgende Mengen zu entsorgen:

- Uranoxid-Brennelemente 41 500 tSM
- Natururanoxid-Brennelemente 800 tSM
- MOX-Brennelemente 2 700 tSM

Das Behälterkonzept der ANDRA sieht für die verglasten Wiederaufarbeitungsabfälle sogenannte Primärbehälter vor [ANDRA 2001], [ANDRA 2005d], die alle aus rostfreiem Stahl gefertigt und mit einem verschweißten Deckel wasserdicht verschlossen werden. Das durchschnittliche Gewicht der gefüllten Behälter beträgt ca. 500 kg; eine Ausnahme bildet der C0.1-Behälter mit 90 kg und einem nicht verschweißten Deckel. In Abbildung 5-14 sind zwei Arten von Primärbehältern für verglasten Abfall aus der Wiederaufarbeitung dargestellt.



Abbildung 5-14: Frankreich – Primärbehälter für verglaste HAW (175 l) (links – C0.2, C1 bis C4, rechts – C0.3) [Haverkate et al. 2006]

Die Primärbehälter mit verglasten Abfällen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden (Abbildung 5-15). Die Hauptfunktion der Endlagerbehälter ist der Schutz der verglasten Abfälle vor einem Kontakt mit Wasser. Darüber hinaus haben diese Endlagerbehälter einen sicheren Einschluss der Abfälle für eine Zeitspanne zu sichern, in der die Aktivität der kurz- und mittellebigen Radionuklide dominierend ist. Durch die im Verhältnis zu den Primärbehältern größere Oberfläche der Endlagerbehälter wird die Wärmeabgabe an die Umgebung erhöht.

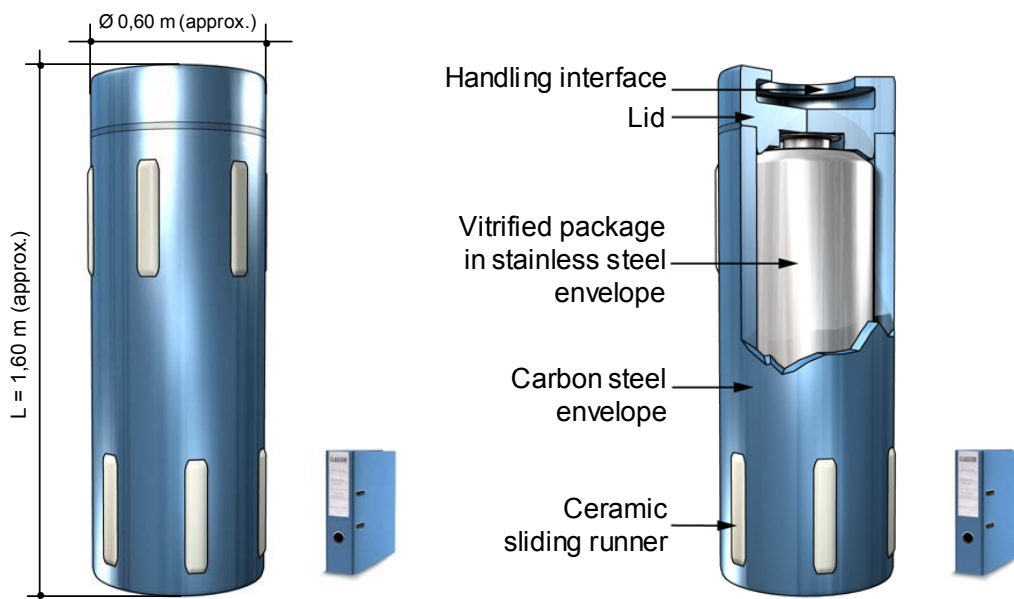


Abbildung 5-15: Frankreich – Typischer HAW-Endlagerbehälter mit keramischen Gleitern an der Behälteraußenwand [ANDRA 2005d]

Die Endlagerbehälter sollen aus nichtlegiertem Stahl hergestellt werden. Die minimale Wandstärke der Behälter wurde mit 55 mm bestimmt, um die Standfestigkeit der Behälter gegen Korrosion und einen sicheren Einschluss der Abfälle für 1000 Jahre zu sichern. Dabei wurde von einer maximalen Temperatur von 100 °C und einem Druck von 12 Mpa ausgegangen. Alle Endlagerbehälter sind vorsorglich mit keramischen Gleitern versehen, um eine Rückholbarkeit aus dem Einlagerungsbohrloch, die gemäß gesetzlicher Vorgabe für die Betriebszeit des Endlagers gewährleistet sein muss, zu erleichtern.

Bis zur Entscheidung der ANDRA im Herbst 2007, das Konzept der Direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen zunächst nicht weiter zu verfolgen, wurden Planungen dafür durchgeführt. Diesen Planungen entsprechend wurden Primärbehälter für ausgediente Brennelemente so ausgelegt, dass sie bis zu 4 unzerschnittene Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente aufnehmen können. Die MOX-Brennelemente werden einzeln verpackt. Die Primärbehälter sollen mit Helium gefüllt werden, um die Wärmeabgabe von den Brennelementen zu erhöhen. Die Wärmeentwicklung eines Behälters mit Uranoxid- und Natururanoxid-BE beträgt nach 60 Jahren Abklingzeit nach Ausladung aus dem Reaktor ca. 1400 W (900 MW-Reaktoren) bzw. 1600 W (1300 MW-Reaktoren) und fällt nach 1000 Jahren auf ca. 180 W ab.

Die Primärbehälter mit den ausgedienten Brennelementen sollen in gleicher Weise wie die Primärbehälter für HAW in Endlagerbehälter verpackt werden. Die Hauptfunktion der Endlagerbehälter ist der Ausschluss eines Kontaktes der Brennelemente mit Wasser in der Periode, wo die Temperatur der Behälter über 80 °C liegt. Je nach Brennelementtyp werden entsprechende Behältertypen (s. Abbildung 5-16) dimensioniert. Die Bandbreite reicht beim Außendurchmesser von 620 mm bis 1255 mm, bei der Länge von 4500 mm bis 5400 mm und beim Gewicht von 8 t bis 43 t.

Die Endlagerbehälter werden aus unlegiertem Stahl hergestellt und bestehen aus zwei Teilen – dem zylindrischen Gehäuse und einem Deckel mit Konstruktionselementen für die Handhabung der Behälter. Die Wandstärke der Behälter von 110 mm bzw. 120 mm wurde so ausgewählt, dass die Behälter wasserdicht über eine Zeit von ca. 10.000 Jahren bleiben und einem isotropischen Druck von 19 Mpa widerstehen.

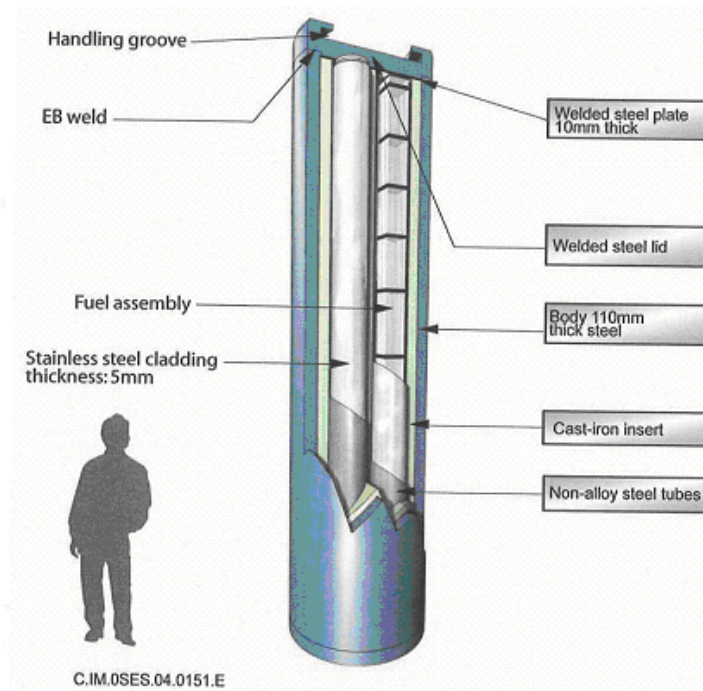


Abbildung 5-16: Frankreich – Prinzipieller Aufbau eines Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente [ANDRA 2005d]

Eine typische Einlagerungszelle stellt ein horizontales Bohrloch mit einem Durchmesser von 700 mm und einer Länge von ca. 40 m dar. Das Bohrloch ist in zwei Abschnitte unterteilt, den Bohrlochkopf und den Einlagerungsabschnitt. Der Bohrlochkopf ist während des Einlagerungsbetriebes mit zwei Metallrohren bestückt, die beim endgültigen Verschluss des Bohrloches entfernt werden. Eines der Rohre stellt den zeitweiligen Ausbau des Bohrloches dar, das andere zeitweilige Rohr bildet den Anschluss zum Einlagerungsrohr. Der Verschluss erfolgt mit einem Metallpfropfen und einem Bentonit-Beton-Stopfen. Im Einlagerungsabschnitt ist das Bohrloch vollständig mit einem dichten Rohr ausgekleidet. Damit soll die gesetzlich vorgeschriebene Option der Rückholung der Endlagerbehälter während der Betriebszeit gewährleistet werden. Mittels einer speziell entwickelten Schiebevorrchtung werden die Endlagerbehälter in das Rohr geschoben. Aus thermischen Gründen werden Abstandshalter zwischen die Endlagerbehälter gepackt. Abbildung 5-17 zeigt eine schematische Darstellung der Endlagerzelle für HAW-Endlagerbehälter.

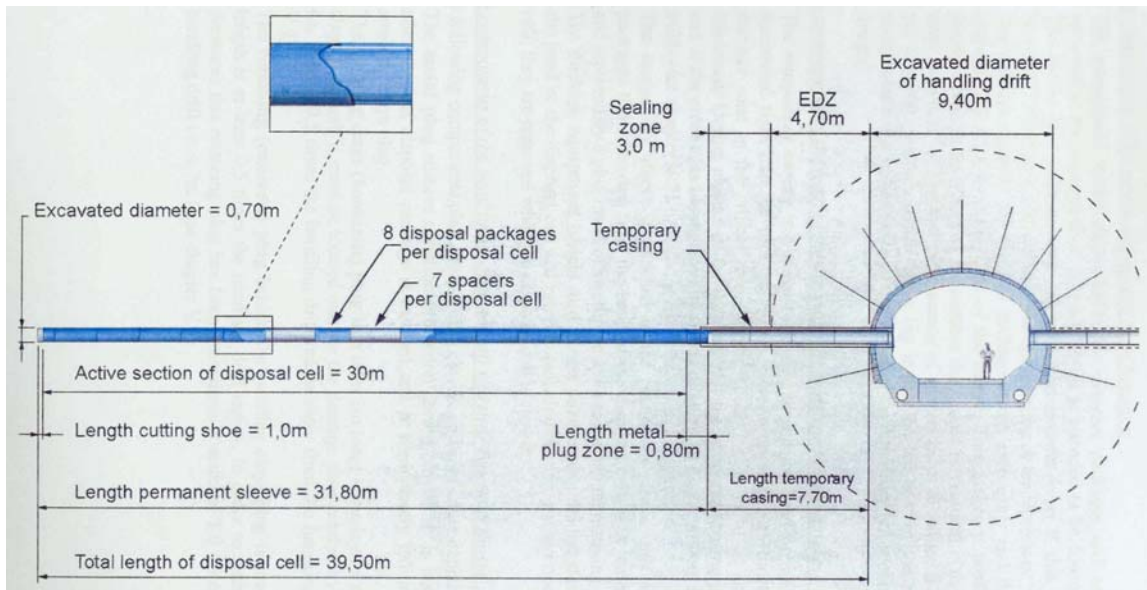


Abbildung 5-17: Schematische Darstellung einer Einlagerungszelle für die Endlagerung von verglasten HAW [ANDRA 2005d]

Die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen sollte ebenfalls in entsprechenden Endlagerzonen des Endlagerbergwerkes erfolgen. Die Anforderungen an eine Rückholbarkeit entsprechen denen für verglaste HAW-Abfälle. Die Endlagerzellen stellen horizontale Bohrungen mit einem Durchmesser von 3200 mm für Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente und 2600 mm für MOX-Brennelemente dar. Die Länge der Bohrlöcher beträgt 43 m bzw. 46 m. Davon sind 32 m bzw. 35 m für die Einlagerung der Gebinde vorgesehen, der verbleibende Abschnitt für Verschlüsse. Der Abstand zwischen den Bohrlochachsen beträgt zwischen 22,5 m und 24 m in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde. Abbildung 5-18 zeigt das Layout einer Einlagerungszelle für ausgediente Brennelemente.

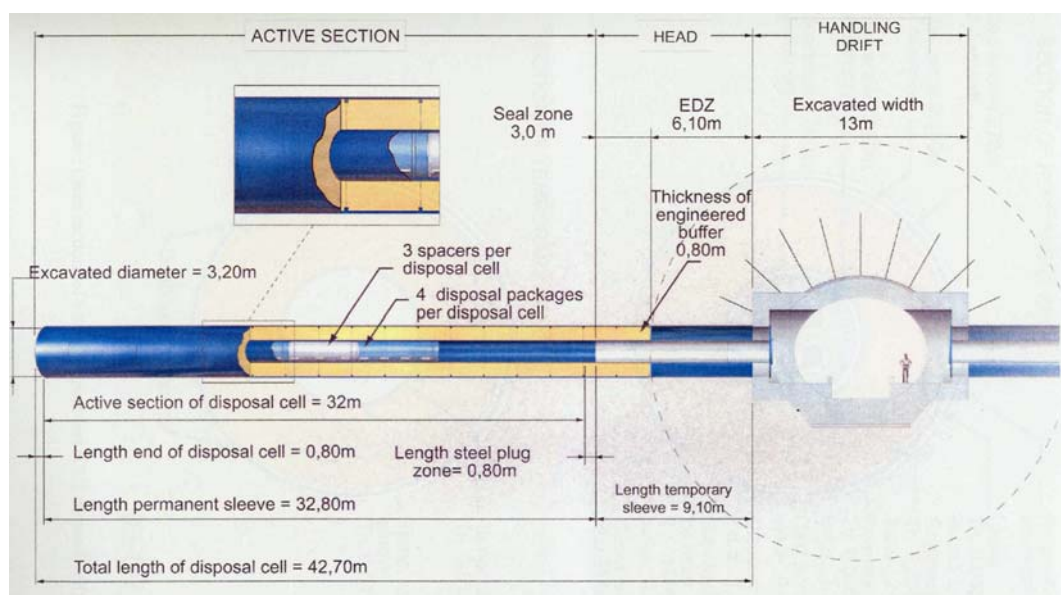


Abbildung 5-18: Schematische Darstellung einer Endlagerzelle für ausgedienten Kernbrennstoff [ANDRA 2005d]

Das Bohrloch ist auch hier mit einem Metallrohr ausgekleidet. Es wird aus 2 m langen Metallringen zusammengefügt und ist perforiert, um einen Zutritt von Feuchtigkeit und damit die Sättigung des Bentonitpuffers zu ermöglichen. Die Perforierung ist so minimal wie möglich gehalten, um die mechanische Standfestigkeit möglichst wenig zu beeinflussen. In das Metallrohr wird eine Bentonitauskleidung eingebracht, die aus zylindrischen Bentonitringen zusammengesetzt wird. Im Innern der Bentonitauskleidung befindet sich das eigentliche Einlagerungsrohr mit einem Innendurchmesser von 1320 mm bzw. 716 mm und einer Wandstärke von 25 mm. Es wird aus ca. 6 m langen Rohrstücken zusammengeschweißt und seine Standfestigkeit bezüglich Korrosion und Druck soll 1000 Jahre erhalten bleiben. Die Metallverkleidung und die Bentonitringe im Kopfteil des Bohrloches sind die gleichen wie für den Einlagerungsteil. Eine Ausnahme bildet die Metallverkleidung in dem Bereich des künftigen Betonverschlussstopfens; sie ist nicht perforiert. Als temporärer Verschluss ist wie bei den Zellen für verglaste Abfälle ein Metallpfropfen vorgesehen.

Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente werden in der Endlagerzone eingelagert, die in sogenannte Einlagerungsmodule eingeteilt ist. Jedes Modul besteht in Abhängigkeit von dem einzulagernden Abfalltyp aus zehn bis zu einigen Hundert Endlagerzellen, die von beiden Seiten der Transportstrecken abgehen. Der Abstand zwischen den Achsen der Einlagerungszellen beträgt zwischen 8,5 m und 13,5 m in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde. Das Endlager soll in einer Tonsteinformation in einer Teufe von ca. 500 m errichtet werden. Abbildung 5-19 zeigt ein schematisches Layout des gesamten Endlagers. Die Tagesanlagen des Endlagers sollen eine Fläche von ca. 50 bis 100 ha und die Untertageanlage von ca. 1500 bis 3000 ha einnehmen. Als Referenzvariante für die Verbindung der Tagesanlagen mit den Untertageanlagen wurde die Errichtung von 4 Schächten ausgewählt, die in einer sogenannten Schachtzone angeordnet sind, die sich am Rand der Einlagerungsfelder befindet. Die Schächte mit einem Durchmesser zwischen 8 m und 11,5 m werden genutzt für den Transport der Abfallgebände nach Untertage und ggf. von Untertage nach Übertage, für Personaltransport und kleinere Ausrüstungen, für Abwetter und Abzug von Rauch bei Feuer sowie für Bergbautransporte.

Im neuen Entsorgungsgesetz Frankreichs, das im Juni 2006 verabschiedet wurde, ist festgelegt, dass bis 2015 der Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in tiefen geologischen Schichten vorliegen und 2025 das Endlager in Betrieb gehen soll. Das Endlager soll am Standort des Untertage-Forschungslabors Bure, Meuse/Haute Marne errichtet werden. Es ist vorgesehen, in einem Endlager in getrennten Einlagerungsbereichen HAW („C-Typ“) und ggf. ausgediente BE („U-Typ“) sowie LILW-LL („B-Typ“) endzulagern [ANDRA 2005d].

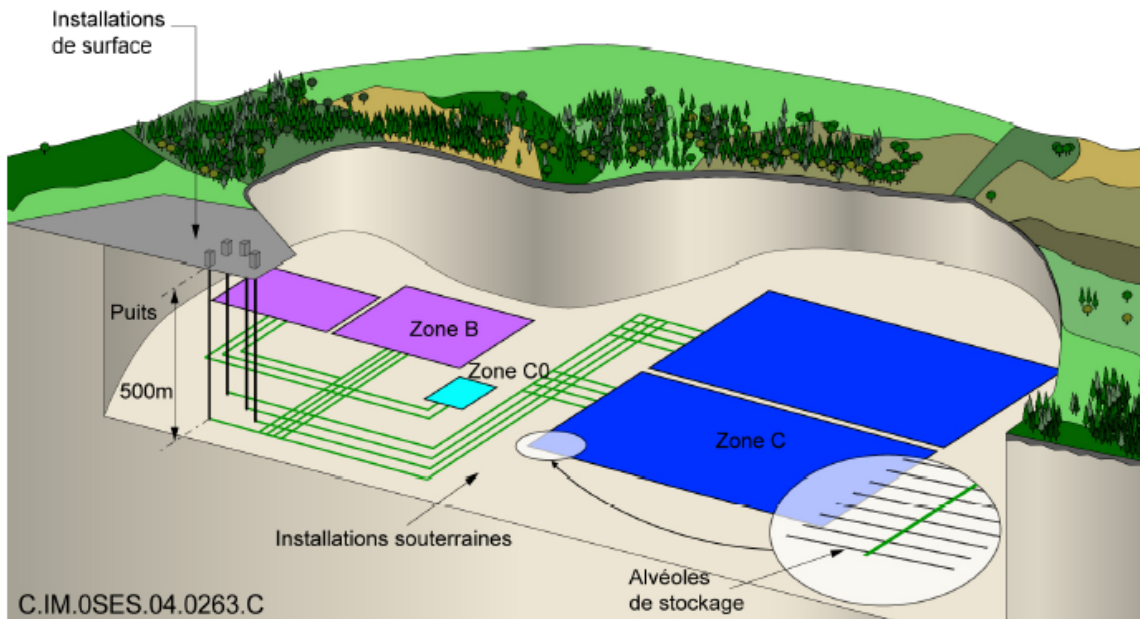


Abbildung 5-19: Frankreich – Schematisches Layout des geplanten Endlagers [Haverkate et al. 2006]

5.2.3 Schweiz

Als Wirtsgestein für die Entsorgung von ausgedienten Brennelementen, hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufbereitung und von langlebigen mittelaktiven Abfällen wurde der Opalinuston ausgewählt. Ausgediente Brennelemente werden in der Schweiz künftig nur noch direkt endgelagert, weil bisher geltende Verträge zur Wiederaufarbeitung von ausgedienten Brennelementen aufgrund gesetzlicher Festlegungen beendet wurden [EKRA 2000]. Bei einer angenommenen 50-jährigen Betriebszeit der Kernkraftwerke werden folgende Mengen an endzulagernden ausgedienten Brennelementen sowie HAW aus der Wiederaufarbeitung in der Schweiz anfallen [NAGRAa], [Grupa et al. 2000], [McKinley & Russel 2002]:

- HAW: 1195 tSM (730 Endlagerbehälter)
- 10500 ausgediente Brennelemente: DWR: 3200 tSM (2065 Endlagerbehälter)
SWR: 2460 tSM (1630 Endlagerbehälter)

Die Wiederaufarbeitungsabfälle werden in HAW-Kokillen (L:1859 mm, D:350 mm) konditioniert und in massive Endlagerbehälter (s. Abbildung 5-20) aus Stahl oder Kupfer mit verschweißtem Deckel verpackt. Zur Minimierung der Strahlung ist eine Bleiabschirmung im Zwischenraum zwischen Kokille und Endlagerbehälter vorgesehen. Die Standfestigkeit der Stahlcontainer wird mit 1.000 Jahren bewertet [CROP], die der Kupferbehälter mit 10^5 Jahren [NAGRAb]. Die endgültige Auswahl des Materials soll entsprechend den standortspezifischen Randbedingungen erfolgen.

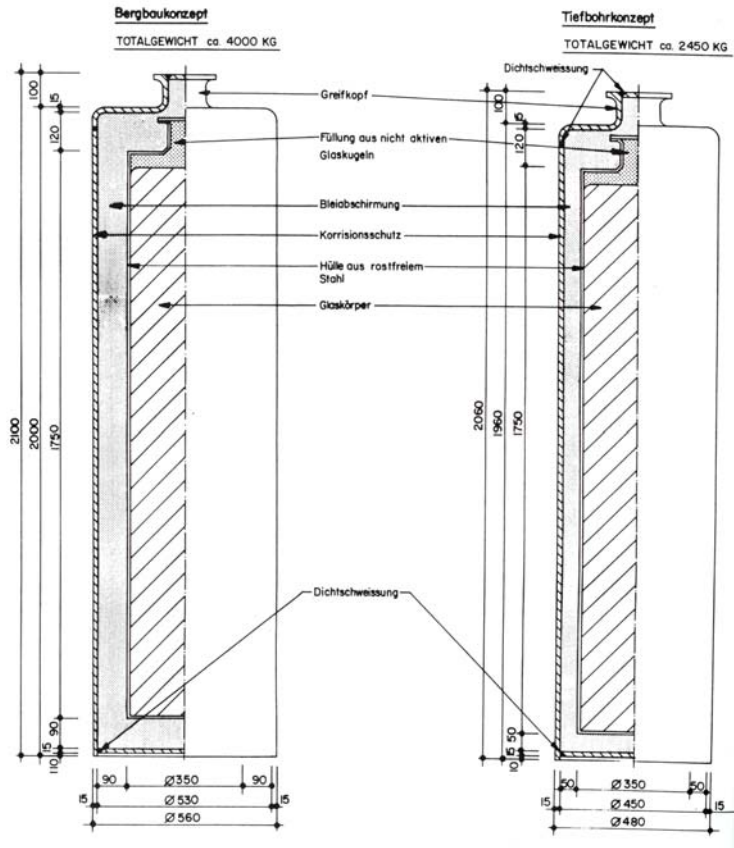


Abbildung 5-20: Schweiz – Endlagerbehälter für HAW-Kokillen [NAGRA 2002b]

Die Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente sind zylindrische Stahlbehälter mit einer Mindestwandstärke von 150 mm, einer Behälterlänge von ca. 5000 mm und einem Durchmesser von ca. 1000 mm. Ein Endlagerbehälter soll entweder 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelemente aufnehmen können. Abbildung 5-21 zeigt eine Prinzipskizze eines solchen Endlagerbehälters.

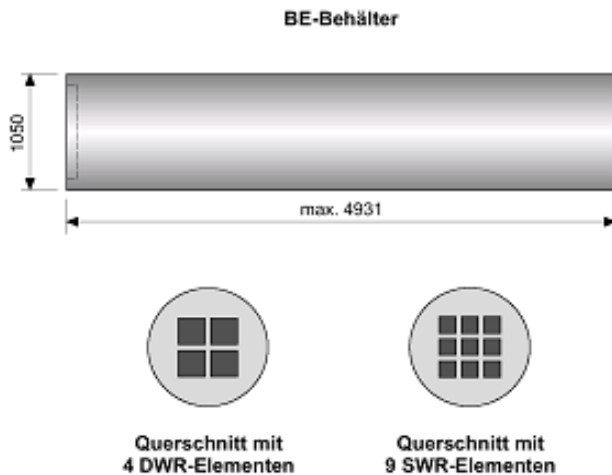


Abbildung 5-21: Prinzipskizze eines Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente [NAGRA 2002b]

Das Einlagerungskonzept sieht für beide Abfallarten (HAW und ausgediente Brennelemente) vor, dass die Endlagerbehälter liegend auf kompaktierten Bentonitblöcken in leicht geneigte Einlagerungsstollen mit einem Abstand von 3 m zwischen den Behältern entlang der Streckenachse eingelagert werden (Abbildung 5-22). Die verbleibenden Hohlräume werden mit Hilfe einer Förderleitung mit Bentonitgranulat unmittelbar nach der jeweiligen Einlagerung eines Behälters verfüllt.

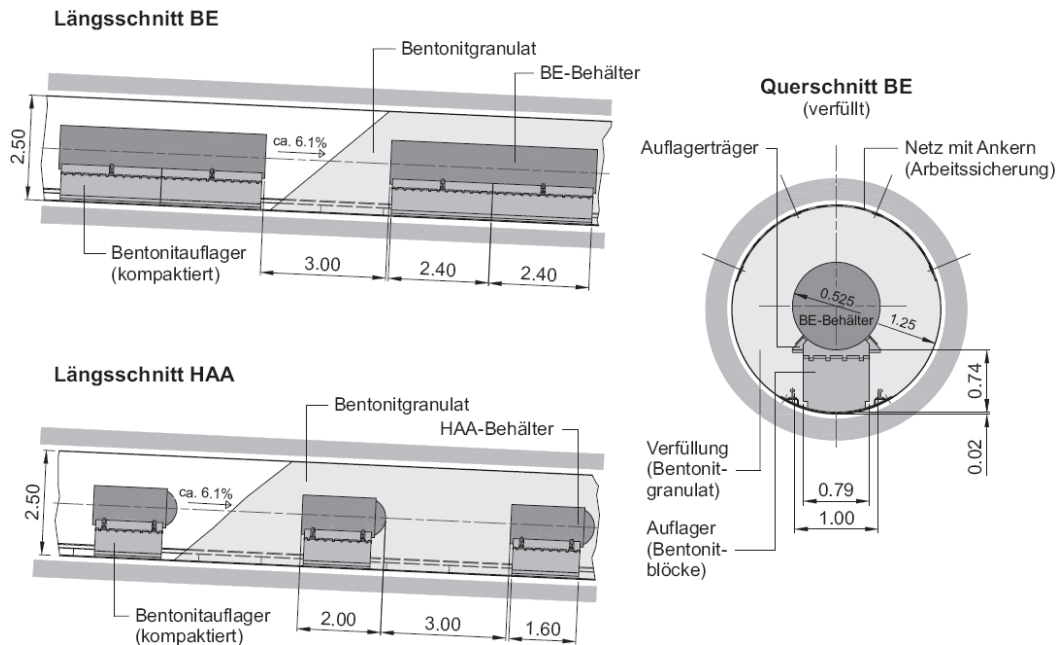


Abbildung 5-22: Schweiz – Einlagerungsschema von BE/HAW in Einlagerungsstrecken (Abmessungen in m) [NAGRA 2002b]

Basierend auf dem Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung wurde in der Schweiz ein Endlagerkonzept für HAW, ausgediente Brennelemente und langlebige mittelaktive Abfälle im Opalinuston entwickelt, das in Abbildung 5-23 dargestellt ist. Das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (KGL) sieht zusätzlich zum eigentlichen Endlager – oder Hauptlager – die Errichtung eines Test- und eines Piloteinlagerungsbereiches (Pilotlager) vor, ferner eine der Endlagerung vorgeschaltete Phase der Beobachtung und erleichterten Rückholbarkeit der Abfälle.

Das Endlager ist in der Mitte der Opalinustonschicht in einer Teufe von ca. 650 m angeordnet, wo der Opalinuston eine Mächtigkeit zwischen 110 – 120 m aufweist. Die Auslegung des Endlagers erfolgte auf der Basis der Einhaltung eines 100 °C-Kriteriums im Wirtsgestein, wobei 100 °C erst innerhalb der Bentonitbarriere erreicht und somit ein Teil der Barriere gezielt „geopfert“ wird. Dieser Opferbereich wird durch eine größere Schichtdicke der Bentonitbarriere kompensiert. Der Zugang zum Endlager soll über eine Rampe sowie einen Schacht erfolgen. Der Schacht dient dem Ein- und Ausbringen von Personen und Material. Er dient ferner als Lüftungsschacht (Ausziehschacht) sowie Notausstieg und hat einen Ausbruchdurchmesser vom 4,0 m. Die Rampe dient in der Betriebsphase dem Transport von Abfallgebinden, Bentonitauflagern und Bentonitgranulat etc. sowie dem Personentransport und der Frischluftzufuhr von der Oberfläche in den Bereich der Lageranlage. Mit Beginn der

Einlagerung wird die Rampe ausschließlich für den Transport der Abfallgebände genutzt. Die zur Einlagerung parallele Errichtung weiterer Einlagerungsstollen erfolgt über die Errichtungsstrecke und den Schacht. Vor der Errichtung der Einlagerungsstrecken im Hauptfeld wird das Pilotendlager errichtet. Dieses besteht aus zwei kurzen Einlagerungsstrecken und einer Kontrollstrecke.

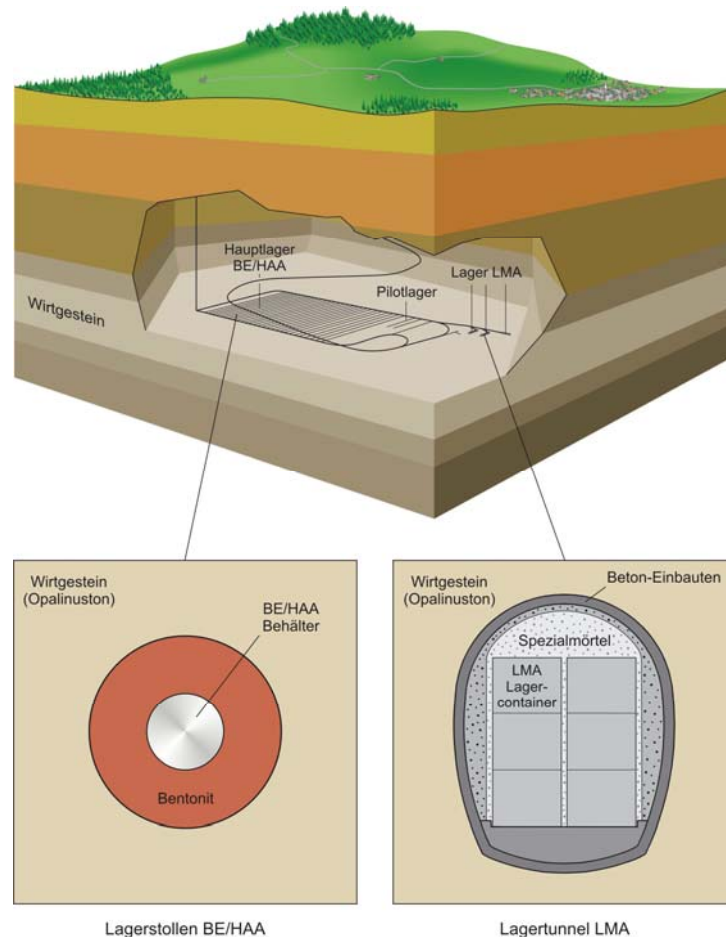


Abbildung 5-23: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten und der Auslegung des Endlagers für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle in der Schweiz [NAGRA 2002a]

Von der NAGRA wurden für die Endlagerung in tiefen geologischen Schichten Gesteinsformationen der Unteren Süßwassermolasse und des Opalinustons untersucht und der Opalinuston als perspektivische Gesteinsformation ausgewählt. Die NAGRA hat im Jahr 2002 die Resultate zum Projekt Opalinuston vorgelegt. Der Bundesrat kam Ende Juni 2006 zum Gesamturteil, dass der gesetzlich geforderte Entsorgungsnachweis für diese Abfälle erbracht ist. Ein konkreter Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist damit jedoch noch nicht festgelegt.

Eine Übertragung der Endlagerkonzepte in Tonstein auf deutsche Verhältnisse wäre grundsätzlich möglich, da nach Feststellung der BGR [Hoth et al. 2007] prinzipiell geeignete Tonformationen in Deutschland vorhanden sind. Dabei sind allerdings die Unterschiede in der auf thermischen Berechnungen basierenden Endlagerauslegung im Vergleich mit dem

aktuellen Endlagerkonzept für den Salzstock Gorleben zu beachten. Im Salz kann eine Grenztemperatur an der Kontaktgrenze Behälter-Wirtsgestein von 200 °C angesetzt werden. Die Verringerung der Grenztemperatur auf 100 °C bei einem Konzept in Tongestein würde eine starke Reduzierung der Wärmeleistung der Endlagerbehälter erfordern. Dazu muss entweder die Zwischenlagerzeit der ausgedienten Brennelemente erhöht oder die Beladung der Behälter im Vergleich zum Endlagerkonzept im Steinsalz verringert werden. Entsprechende Untersuchungen [Polster 2004] haben gezeigt, dass außerdem konzeptionelle Änderungen der Endlagerauslegung, wie Vergrößerungen der Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken, erforderlich wären, und der Flächenbedarf für die Einlagerung um ca. den Faktor 10 im Vergleich zur Endlagerung in einer Salzformation ansteigen würde.

5.3 HAW-Endlager in Salzgestein

In Deutschland werden radioaktive Abfälle in wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung eingeteilt. Diese Klassifizierung stellt die Grundlage zur Endlagerung aller radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands dar. Als Wirtsgestein für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurde bereits in den 1960er Jahren Salz favorisiert. Der 1977 ausgewählte Salzstock bei Gorleben wird seit 1986 untertägig erkundet.

Bis Mitte 2005 wurden ausgediente Brennelemente im Rahmen von Verträgen mit Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich und Großbritannien aufgearbeitet. Die seitdem anfallenden ausgedienten Brennelemente werden bis zu einer möglichen direkten Endlagerung in Zwischenlagern an den KKW-Standorten oder im zentralen Zwischenlager in Gorleben gelagert. Das endzulagernde Inventar an hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen basiert auf dem Mengengerüst des Entwurfs des Nationalen Entsorgungsplans [BMU 2003] und einer Aktualisierung aus den Ergebnissen der Anfragen bei den Hauptablieferern. In [ISIBEL 2008] sind entsprechende Abschätzungen für die bis zum Jahr 2040 anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle vorgenommen worden. Daraus ergibt sich folgendes Mengengerüst:

- Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA) von 6.077 tSM ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren sowie 91 tSM (aus WAK)
- ca. 10.680 tSM ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren (SWR, DWR und WWER) zur direkten Endlagerung

Tabelle 5-1: Mengengerüst der hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle in Deutschland [ISIBEL 2008]

Abfallart	Endlagergebindetyp	Anzahl der Gebinde
Verglaste Abfälle aus der WA (AREVA NC, BN-GS, WAK)	HAW-Kokille	3.767
	CSD-B	560
Verpresste Hülsen- und Strukturteile, technologischer Abfall aus der WA	CSD-C	6.902

Abfallart	Endlagergebündetyp	Anzahl der Gebinde
Brennelemente	POLLUX-Behälter	2.045
	oder Brennstabkokille (BSK)	oder 6.817

Die Wiederaufarbeitungsabfälle werden, wie in Tabelle 5-1 dargestellt, in drei verschiedenen Behältern konditioniert; in HAW-Kokillen, in CSD-B und in CSD-C. Die HAW-Kokillen (Edelstahlkokillen mit 5 mm Wandstärke) enthalten die verglasten, beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehenden Spaltproduktlösungen. Der Behälterkörper wird mit einem Deckel dicht verschweißt, der zwecks Behälterhandhabung mit einem Tragpilz versehen ist. Die radioaktiven Reststoffe aus der Betriebsabwasseraufbereitung in der Wiederaufarbeitungsanlage werden verdampft und die Konzentrate als mittelradioaktive Glasprodukte in die CSD-B-Kokille konditioniert. Die Abmessungen dieses Edelstahlbehälters entsprechen denen der HAW-Kokille. Die CSD-C-Kokille, die geometrisch fast identisch ist mit einer HAW-Kokille, dient zur Aufnahme der zu Presslingen kompaktierten Brennelementhülsen und Technologieabfälle. Abbildung 5-24 zeigt Prinzipskizzen von einer HAW-Kokille und von einer CSD-C.

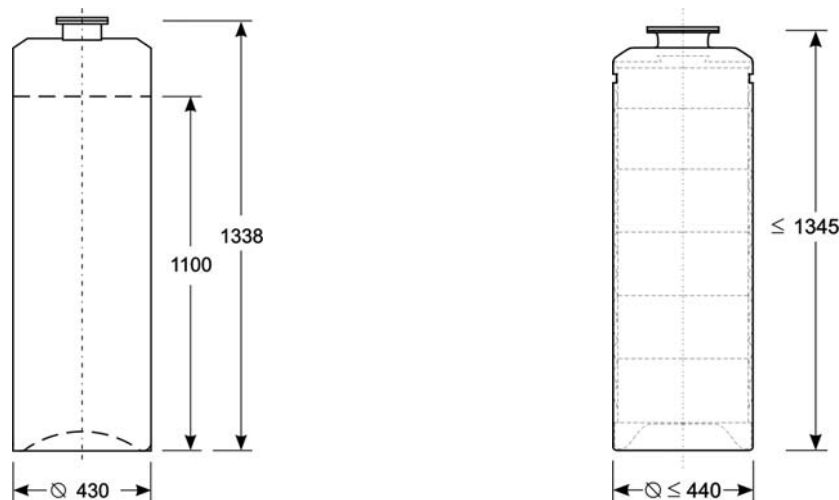


Abbildung 5-24: Skizzen von einer HAW-Kokille (links) und von einer CSD-C (rechts)

Für die direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen sollen Behälter vom Typ POLLUX oder Brennstabkokillen eingesetzt werden. Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornstahl, hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 DWR-BE oder 6 SWR-BE eingesetzt wird. Der Außenbehälter, der gleichzeitig ein Abschirmbehälter ist, hat eine Wandstärke von ca. 270 mm und ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss hergestellt. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. In der Abbildung 5-25 ist beispielhaft der POLLUX-10 mit den gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-BE dargestellt.

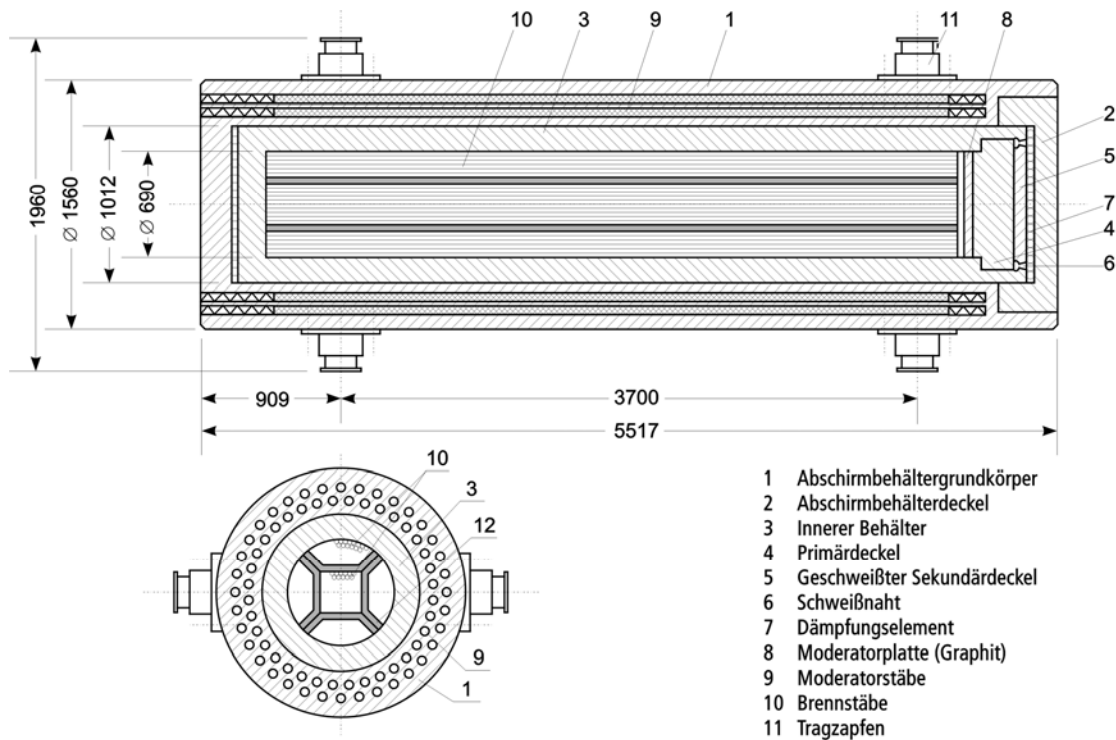


Abbildung 5-25: Zeichnung eines POLLUX-10-Behälters in Längsschnitt (oben) und im Querschnitt (unten)

Die Brennstabkokille BSK (s. Abbildung 5-26) wurde als Alternative zum POLLUX-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE (in zwei Brennstabbüchsen) entworfen. Die Geometrie des Behälters (mit Ausnahme der Länge) korrespondiert weitgehend mit der einer HAW-Kokille, einer CSD-B bzw. einer CSD-C. Dies eröffnet die Möglichkeit der Handhabung mit weitgehend identischen Hebezeugen und die Einlagerung in gleichkalibrigen Bohrlöchern.

Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke [GNB 1998] und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl. Der innere Schachtraum wird zunächst durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen. In einer Aussparung in der Deckelunterseite wird eine Moderatorplatte zur Neutronenabschirmung eingelegt. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters ist dieser Deckel mit einem Tragpilz ausgestattet.

Gewicht, beladen: 5,266 kg

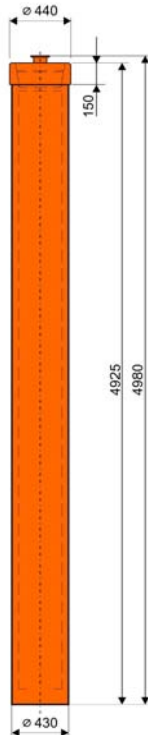


Abbildung 5-26: Prinzipskizze einer Brennstabkokille (BSK)

Zusätzlich zu den vorgenannten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente und WA-Abfälle werden spezielle CASTOR-Behälter zum Transport und zur Lagerung von Brennelementen aus Forschungsreaktoren und kerntechnischen Versuchsanlagen genutzt. Diese Transport- und Lagerbehälter sollen die Kugelbrennelemente aus dem AVR und dem THTR aufnehmen sowie Brennelemente aus den Forschungsreaktoren KNK II, FRM II und RFR der VKTA. Inwiefern diese CASTOR-Behälter auch zur Endlagerung genutzt werden können, ob eine Umladung der Forschungsreaktorbrennelemente in andere Endlagerbehälter möglich ist oder neue zu entwickeln sind, muss untersucht werden. Einzelheiten zu den unterschiedlichen CASTOR-Behältern sind im Anhang 4 zu diesem Bericht beschrieben.

Das Referenzkonzept für die Endlagerung in Deutschland sieht die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente) in einem Salzstock vor. Die Errichtung des Endlagers ist in einer Teufe von ca. 870 m geplant. Ausgediente Brennelemente werden entsprechend diesem Konzept in horizontalen Strecken mittels selbstabschirmender sogenannter POLLUX-Behälter eingelagert. Die Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen (HAW-Kokillen, CSD-C und CSD-B) ist in vertikalen, bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern geplant. Abbildung 5-27 zeigt in einer Prinzipskizze die wesentlichen Elemente des Endlagerreferenzkonzeptes in Salz. Von über Tage werden die Endlagerbehälter mit den radioaktiven Abfallstoffen über einen der beiden Tagesschächte (Durchmesser 7,5 m), über den ausziehenden Wetterschacht, bis auf das Einlagerungsniveau transportiert. Dafür ist dieser mit einer Förderanlage für eine maximale Nutzlast von 85 t ausgerüstet. Der zweite Schacht dient als Frischwetterschacht und zum Transport von Personal und Material. Am Füllort übernimmt eine batteriebetriebene Grubenlokomotive den Weitertransport der Endlagerbehälter bis zum Einlagerungsort im Endlagerbergwerk. Dort ist die jeweilige Einlagerungsvorrichtung positioniert und übernimmt

die Endlagerbehälter zur Einlagerung in der Strecke oder in das Bohrloch. Der verbleibende Hohlraum um den POLLUX-Behälter wird nach jedem Einlagerungsvorgang mit Salzgrus versetzt. Bei der Bohrlochlagerung wird das mit Kokillen gefüllte und mit Salzgrus versetzte Bohrloch mit einem speziellen Verschluss direkt verschlossen. Wenn alle Bohrlöcher einer Einlagerungsstrecke verschlossen sind, wird auch diese Strecke mit Salzgrus verfüllt. Am Ende der Betriebszeit des Endlagers werden die restlichen Grubenräume im Endlager verfüllt und mit Abschlussbauwerken gegenüber den Schächten abgedichtet. Die Verfüllung und der Verschluss der beiden Schächte bilden die letzten Maßnahmen bei der Stilllegung des Endlagers. In einem Entwurf des BMU zu Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle werden auch gesetzliche Regelungen formuliert, die eine Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle fordern; dementsprechend sind Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung radioaktiver Abfälle im Endlagerkonzept vorzusehen [BMU 2009].

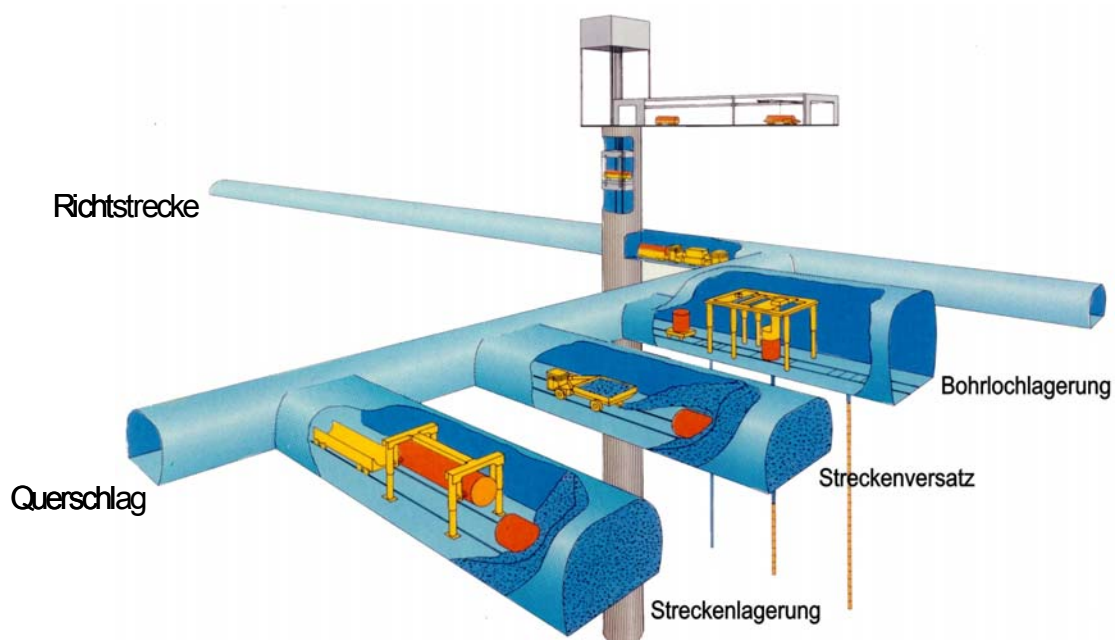


Abbildung 5-27: Schematische Zeichnung zum deutschen Referenzendlagerkonzept im Salz

Voraussetzung für einen positiven Beschluss der Genehmigungsbehörde für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers ist ein Langzeitsicherheitsnachweis, der auf Grundlage der Standortdaten und des technischen Endlagerkonzepts zeigt, dass die eingelagerten radioaktiven Abfälle langfristig sicher von der Biosphäre isoliert sind. Darüber hinaus sind Nachweise zu erbringen, dass die vorgesehenen Verfahren und Einrichtungen dem Stand der Technik entsprechen. Deshalb wurden bereits in den 1980er Jahren parallel zur übertägigen und untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben grundlegende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung wärmeentwickelnder Endlagergebilde durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente bis zur Anwendungsreife entwickelt und erprobt. Dazu wurde ein Programm aufgelegt, das unter Einbeziehung der Industrie, die einen entsprechenden Endlagerbehälter (POLLUX) und die dafür erforderlichen Konditionierungsanlagen entwickelte, auch zwei De-

monstrationsversuche zur Transport- und Einlagerungstechnik vorsah. So wurde zum Einen im Maßstab 1:1 in einem übertägigen Versuchsstand das Be- und Entladen des Förderkorbes mit Transportwagen und POLLUX-Behälter 2000-mal erfolgreich demonstriert. Dadurch wurde der Transport schwerer Nutzlasten bis 85 t über eine Schachtförderanlage (sicherer Transport von 65 t schweren POLLUX-Behältern und Transportwagen von 20 t durch den Schacht) nach untertage simuliert [DBE 1994]. In dem zweiten Versuchsstand wurde die Einlagerung von POLLUX-Behältern (Abbildung 5-28) auf der Sohle einer nachgebildeten Einlagerungsstrecke ebenfalls 2000-mal im Maßstab 1:1 erfolgreich demonstriert [DBE 1995]. Beide Versuchsstände berücksichtigten dabei die endlagerrelevanten Randbedingungen, wie z. B. Geometrie des Schachtes und der Einlagerungsstrecken sowie gleichgebundener Transport vom Schachtfüllort bis zur Einlagerungsstrecke. Im Rahmen der vorgenannten beiden Demonstrationsversuche wurde die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Transportes eines mit einem POLLUX-Behälter beladenen Plateauwagens und die Einlagerung von POLLUX-Behältern nachgewiesen.

Mit erfolgreichem Abschluss beider Demonstrationsversuche wurde Mitte der 1990er Jahre ein neuer Stand der Technik in diesem Bereich erreicht, der auch seinen Niederschlag in einer Ergänzung zum Atomgesetz (Artikelgesetz von 1994) fand. Demnach ist die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente ein gleichwertiger Entsorgungsweg zu dem bis dahin allein gültigen Entsorgungsweg von radioaktiven Abfällen über die Wiederaufarbeitung.



Abbildung 5-28: Fotos von Demonstrationsversuchen mit der Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter (links: Lokomotive zieht Plateauwagen unter Einlagerungsvorrichtung hervor; rechts: Einlagerungsvorrichtung legt den POLLUX-Behälter auf die Streckensohle)

Die Einlagerung von wärmeentwickelnden ungeschirmten Endlagerbehältern (z. B. HAW-Kokille und Brennstabkokille) ist gemäß Referenzkonzept in vertikale Bohrlöcher vorgesehen. Die Tiefe der vertikalen Bohrlöcher beträgt bis zu 325 m, die nutzbare Bohrlochlänge abzüglich 10 m für den Bohrlochverschluss und 25 m für nicht abförderbares Bohrklein ca. 290 m. Für die Bohrlochlagerung werden die vorgesehenen Einlagerungsstrecken in regelmäßigen Abständen mit Bohrlöchern versehen. Die Bohrarbeiten beginnen entsprechend der Reihenfolge der späteren Verfüllung am hinteren Ende einer Einlagerungsstrecke und enden am Abzweig zum Querschlag. Jedes Bohrloch wird mit einem betonierten Bohrlochkeller versehen, der mit einem Bohrlochdeckel verschlossen wird. Der Bohrlochdeckel ermöglicht das Überfahren der vorbereiteten leeren Bohrlöcher während des Einlagerungsbetriebes.

Die Einlagerung der Gebinde in die Bohrlöcher erfolgt mit einer Maschine, mit der die Endlagerbehälter (Brennstabkokille oder HAW-Kokille) aus einem abgeschirmten Transferbehälter über ein Schleusensystem in die Bohrlöcher abgesenkt werden (s. Abbildung 5-29).

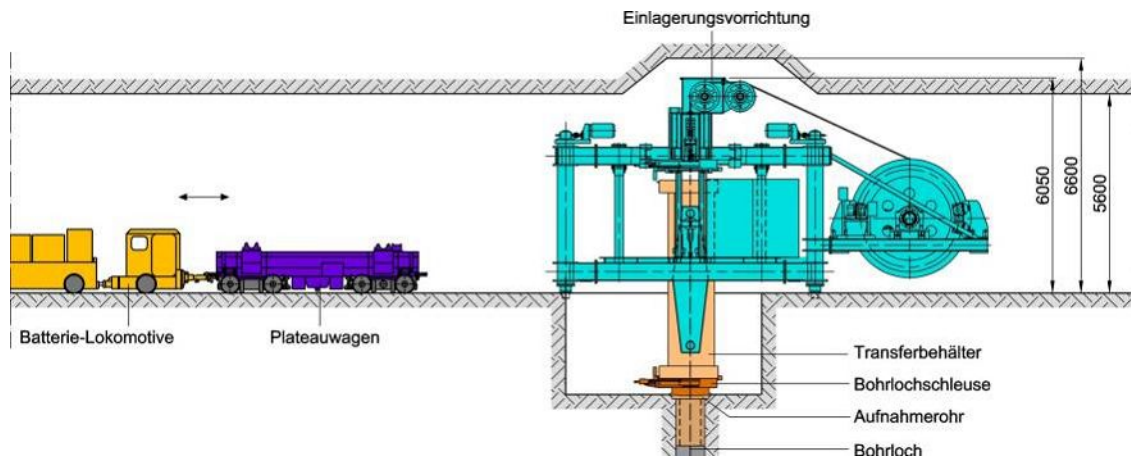


Abbildung 5-29: Systemzeichnung der Einlagerungstechnik für die Bohrlochlagerung von HAW- und Brennstabkokillen

Ein solches Einlagerungssystem wurde im Rahmen eines FuE-Vorhabens entwickelt, gefertigt und in einem übertägigen Versuchsstand vom Sommer 2008 bis Herbst 2009 erprobt [Filbert et al. 2010]. Die Zuverlässigkeit dieses Einlagerungssystems, das die Anforderungen aus dem Atomgesetz und Bergrecht erfüllt, konnte dadurch nachgewiesen werden.

Abbildung 5-30 zeigt ein Foto von der entsprechenden Versuchsanlage, die in einer ehemaligen Turbinenhalle eines Kraftwerks auf einer Stahlplattform errichtet wurde. Die dort zu sehende Einlagerungsvorrichtung steht fest positioniert über dem Bohrlochkeller und dem Bohrloch, das in dieser Demonstrationsanlage durch ein 10 m Stahlrohr simuliert wurde. Mit mehr als 1000-maliger Belastung aller Komponenten konnte die Zuverlässigkeit dieses Einlagerungssystems nachgewiesen werden. Damit ist auch für die Einlagerungstechnik von Brennstabkokillen und HAW-Kokillen ein neuer Stand der Technik erreicht. Die Robustheit dieses Systems sowie des Systems für POLLUX-Endlagerbehälter müsste unter den Bedingungen eines Bergwerkes unter Tage in Demonstrationsversuchen überprüft werden.

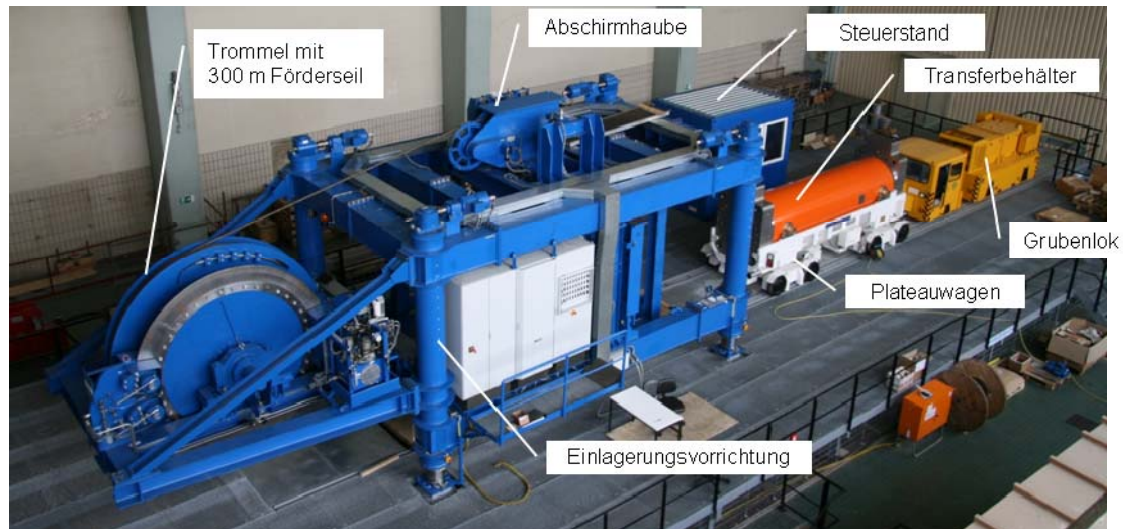


Abbildung 5-30: Versuchsanlage zur Demonstration der Einlagerung von BSK 3 bzw. HAW-Kokillen

5.4 Zusammenfassende Bewertung

In den betrachteten 6 Ländern (Finnland, Schweden, Belgien, Frankreich, Schweiz, Deutschland) wurden technische Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle und ausgedienter Brennelemente für die Wirtsgesteinsformationen Kristallin, Ton/Tonstein und Salz zum Teil bereits weit entwickelt. Für einzelne Komponenten der Konzepte wurde deren Robustheit und Zuverlässigkeit in Demonstrationsvorhaben erprobt und nachgewiesen. So wurden beispielsweise für die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in Kristallingestein im Untertagelabor Äspö in Schweden Einlagerungsfahrzeuge und -maschinen im Maßstab 1:1 gebaut und auf ihre prinzipielle Funktionsweise In-situ überprüft. Für das Endlagerkonzept in Salz in Deutschland wurden sowohl für den Transport von POLLUX-Behältern durch den Schacht nach unter Tage als auch im Endlagerbergwerk selbst die entsprechenden Maschinen und Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Anforderungen aus dem Bergrecht und dem Atomgesetz im Maßstab 1:1 gefertigt, übertägig erprobt und damit deren Zuverlässigkeit nachgewiesen. In gleicher Weise gilt dies für die Einlagerungstechnik sowohl für das Konzept der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern als auch für das Konzept der Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen und HAW-Kokillen. Für beide Konzepte liegt eine auf Zuverlässigkeit erprobte und von externen Sachverständigen geprüfte Einlagerungstechnologie vor. Eine Überprüfung unter realen Bergwerksbedingungen unter Tage steht noch aus.

Noch notwendige Untersuchungen zu den vorgestellten Endlagerkonzepten betreffen vor allem die abschließende Überprüfung der technischen Machbarkeit z. B. von Einlagerungskonzepten für Endlager in Tonstein. So sind die in der Schweiz, Frankreich und Belgien konzipierten Transport- und Handhabungstechnologien noch bis zur betrieblichen Anwendungsreife weiterzuentwickeln und zu erproben. In Anhang 4 zu diesem Bericht sind umfangreiche Erläuterungen zu den vorgenannten technischen Endlagerkonzepten zusammenfassend beschrieben.

6 Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss von HAW-Endlagern

Die technischen Maßnahmen zur Errichtung der übertägigen Anlagen eines zukünftigen Endlagerbergwerks werden vom spezifischen Konzept zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Konditionierung, Transport- und Endlagerbehälter) sowie vom nationalen Regelwerk (Atomgesetz, Baurecht etc.) bestimmt. Das Konzept für die Errichtung der untertägigen Anlagen hängt darüber hinaus vom Wirtsgesteinstyp und von den standortspezifischen geologischen Verhältnissen ab sowie von zusätzlichen Anforderungen aus dem Bergrecht (zumindest in Deutschland). In den nachfolgenden Kapiteln wird für die Wirtsgesteine Kristallin, Tonstein und Salz zusammenfassend beschrieben, wie die untertägigen Hohlräume eines Endlagerbergwerkes hergestellt, wie Endlagerbehälter transportiert und eingelagert werden, wie ein Überwachungskonzept aussieht und was die wesentlichen Elemente eines Verfüll- und Verschlusskonzeptes ausmacht.

6.1 Errichtung der übertägigen Anlagen

Die Konzepte für die Tagesanlagen sind in den in diesem Vorhaben betrachteten 6 Ländern trotz unterschiedlicher Endlagerkonzepte einander sehr ähnlich. Die Anlagen gliedern sich in kerntechnische Anlagen (Empfangshalle, Pufferhalle, heiße Zelle für Umladen und ggf. Reparatur, Schacht und/oder Rampe für Transport nach unter Tage), den industriell / bergbaulichen Bereich (Werkstätten, Lagerhallen, ggf. Einrichtungen zur Herstellung und Vorbereitung von Verfüll-/Verschlussmaterial, Versorgung etc.), den Verwaltungsbereich und die Halde für das aus dem jeweiligen Endlagerbergwerk gewonnene Haufwerk. Das Design der kerntechnischen Anlagen richtet sich nach den vorgesehenen Abfalltypen (ausgediente Brennelemente, verglaste hochradioaktive Abfälle, wärmeentwickelnde mittlerradioaktive Abfälle), den verwendeten Transport- und Endlagerbehältern, dem Konzept für den An- und Abtransport der Abfallgebände sowie den Anforderungen des kerntechnischen Regelwerks. Bezüglich der Errichtung kann in vielen Aspekten auf Erfahrungen in anderen kerntechnischen Anlagen – z. B. Zwischenlagern und Konditionierungsanlagen – zurückgegriffen werden. Die industriellen und bergbaulichen Tagesanlagen müssen die Anforderungen des Baurechts und des Bergrechts erfüllen. Dabei werden überwiegend Anlagen, Systeme und Komponenten eingesetzt, die sich in Bergbau und Industrie bewährt haben. Neue Technologien werden in der Regel vor dem Einsatz durch Pilotanlagen erprobt. So wurde in Gorleben in der Nähe des Erkundungsbergwerks und neben dem Zwischenlager für Transport- und Lagerbehälter eine Pilotkonditionierungsanlage errichtet, in der die radioaktiven Abfälle in Endlagerbehälter umgepackt und Brennelemente ggf. vorher demontiert und zerlegt werden können. Die Anlage ist nach erfolgreicher Durchführung einer Kalterprobung betriebsbereit. Allerdings besteht derzeit nur eine Genehmigung für die Reparatur von Transport- und Lagerbehältern bzw. für ein eventuell erforderliches Umladen von einem defekten Behälter in einen neuen Behälter.

6.2 Errichtung der untertägigen Anlagen

Mit dem Abteufen und Ausbau von Schächten und dem Auffahren von Rampen wird der Zugang zum untertägigen Endlagerbergwerk geschaffen. Die wirtsgesteinsspezifischen Verfahren zum Herstellen von Schächten, Rampen, Strecken und Bohrlöchern werden nachfolgend dargestellt.

6.2.1 Kristallingestein

Bezüglich der Errichtung von Endlagerbergwerken für radioaktive Abfälle in Kristallingesteinen kann auf umfangreiche Erfahrungen zurückgegriffen werden, die weltweit im Bereich des Erzbergbaus sowie im Tunnelbau gesammelt wurden. Praktische Erfahrungen mit der Errichtung und dem Betrieb von Endlagerbergwerken für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Kristallingesteinen liegen aus Schweden (SFR), Norwegen (Himdalen) und Finnland (Loviisa, Olkiluoto) sowie aus den Unterlagelaboren Äspö (Schweden) und ONKALO (Finnland) vor. Auf der Grundlage dieser praktischen Erfahrungen wurden auch für generische Endlagerkonzepte Planungen für die Errichtung und den Betrieb erstellt. Aufgrund der hohen mechanischen Stabilität der Kristallingesteine ist bei Berücksichtigung der Spannungsverteilungen im Gebirge bei der Planung des Endlagers ein stabilisierender Ausbau von Grubenräumen grundsätzlich nicht erforderlich. Wasserführende Klüfte erfordern aber bereichsweise Maßnahmen zur Abdichtung.

6.2.1.1 Erstellen von Schächten und Rampen

Die wesentlichen Techniken für das Schachtabteufen sind das Schachtbohrverfahren und das Bohr-/Sprengverfahren. In Hartgesteinen werden in der Regel Bohr- und Sprengverfahren bevorzugt. Falls, wie z. B. im oberflächennahen Deckgebirge, lockere bzw. wasserführende Schichten oder Störungszonen durchteuft werden müssen, so wird das Bohr-/Sprengverfahren mit Gefrier- oder Injektionsverfahren kombiniert, um diese Gesteine abzudichten bzw. zu stabilisieren.

Vorlaufend zum Schachtabteufen findet eine Detailerkundung der geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse statt, um Details der Teufarbeiten zu planen sowie die Eignung konkreter Gesteinsbereiche für den Einbau verschiedener Einrichtungen zu überprüfen. Anschließend wird durch das Deckgebirge und die oberen, aufgelockerten Kristallinbereiche ein Vorschacht bis in mehrere Zehnermeter Tiefe abgeteuft. Falls lockere Deckgebirgsgesteine vorliegen, kann dieser Teil des Schachtes im Bohrverfahren erstellt werden. Sobald der Granitkörper erreicht wird, wird auf das Bohr- und Sprengverfahren übergewechselt. Dieses Verfahren wird auch bei der Erstellung des Hauptschachtes fortgeführt. Während der Teufarbeiten wird der Schachtstoß durch Netze, Anker und Spritzbeton gesichert und durch Injektionen stabilisiert und abgedichtet. In Abschnitten von 5 – 10 m wird der Schachtausbau aus Betonelementen nachgezogen.

Sobald aus dem Abteufen des ersten Schachtes oder der Rampe ausreichend detaillierte Kenntnisse über den geologischen Bau sowie die Eigenschaften des Deckgebirges und der Kristallingesteine vorliegen, können die übrigen Schächte auch im Raise-Bohrverfahren erstellt werden [SKB 2006], [ANDRA 2005c] (Abbildung 6-1). Dabei wird ausgehend von einer Pilotbohrung der Bohrlochdurchmesser mit Hilfe einer Schachtbohrmaschine von unten nach oben auf den gewünschten Durchmesser erweitert. Es ist auch eine Kombination von Raise-Bohr- und Bohr-/Sprengverfahren für die Erstellung der Schächte möglich.

Rampen wurden bisher, z. B. in den skandinavischen Enlagerprojekten, meist im Bohr- und Sprengverfahren erstellt. Wie bei den Schächten ist eine detaillierte Vorerkundung durch Bohrungen, Geophysik, hydrogeologische Tests etc. erforderlich. In den oberflächennahen Bereichen mit aufgelockerten und wasserführenden Gesteinen wird die Rampe durch einen Stahlbetonausbau gesichert. In tieferen Teilen reicht eine Sicherung durch Stahlnetze und Anker (Abbildung 6-2). Lediglich mechanisch instabile Bereiche oder Abschnitte mit Wasserzutritten werden durch Zementinjektionen sowie einen Betonausbau stabilisiert und abgedichtet.



Abbildung 6-1: Raise-Bohrkrone für die Erstellung des Personenschachtes für die Rock Characterization Facility ONKALO, Finnland [Posiva]



Abbildung 6-2: Rampe der Rock Characterization Facility ONKALO mit Anker- und Netzsicherung der Streckenwandung, Finnland [Posiva]

6.2.1.2 Erstellen von Strecken und Kammern

Nach der Erstellung der Zugänge zum Endlagerbergwerk sind untertage der Infrastrukturbereich, die Erkundungs- und Verbindungsstrecken sowie – je nach Bedarf – die Einlagerungsbereiche aufzufahren. Die für diese Arbeiten einzusetzenden Geräte und Auffahrungsstrategien entsprechen – abgesehen von den Einlagerungsbereichen – dem Stand der Technik im Bergbau. Weiterhin liefern der Bau und Betrieb von Untertagelaboren im selben Wirtsgesteinstyp und z. T. an den vorgesehenen Endlagerstandorten wichtige Grundlagen für die Planung der Auffahrung des Endlagerbergwerks [Posiva 2007], [SKB 2006].

Prinzipiell kommen drei verschiedene Verfahren für die Erstellung von Grubenräumen in Frage:

- Bohr- und Sprengverfahren
- Vortrieb mit Teilschnittmaschine
- Vortrieb mit Vollschnittmaschine

Der Einsatz des jeweiligen Verfahrens ergibt sich aus geologischen, bergbaulichen, langzeitsicherheitlichen und finanziellen Erwägungen. Während das Bohr- und Sprengverfahren sowie der Vortrieb mit Teilschnittmaschinen flexibel bezüglich der Geologie und dem bergbaulichen Einsatz sind, erfordert der Einsatz von Vollschnittmaschinen, wie sie z. B. im Tunnelbau eingesetzt werden, eine bestimmte Gebirgsfestigkeit, um eine zuverlässige Verspannung der Maschine gegen den Streckenmantel zu gewährleisten. Zudem eignen sich die großen Vollschnittmaschinen aufgrund ihrer Abmessungen nur zum Erstellen langer Strecken mit großen Kurvenradien. Dabei erreichen sie hohe Vortriebsgeschwindigkeiten. Der Investitionsaufwand ist sehr hoch. Prinzipiell sind schneidende Verfahren gebirgsschonender als das Bohr- und Sprengverfahren. Dieser Punkt ist aus langzeitsicherheitlichen

Gründen relevant, da die durch die Auffahrung bedingten Auflockerungszonen um die Grubenräume potenzielle Wegsamkeiten für Lösungen während der Nachbetriebsphase darstellen können. Während der Streckenauffahrung findet immer eine vorausseilende geologische Erkundung statt, um wasserführende Störungen und Klüfte zu identifizieren und ggf. vor der Auffahrung durch Zementinjektionen abzudichten.

Bezüglich der bergbaulichen Errichtungsplanung ist in den skandinavischen Endlagerkonzepten jeweils das Untertagelabor der Ausgangspunkt für die weitere Errichtung des Grubengebäudes des Endlagers [Posiva 2007], [SKB 2006]. Der konventionelle Infrastrukturbereich des Endlagers kann noch während des Betriebes des Untertagelabors errichtet werden [Posiva 2007]. Der Infrastrukturbereich für den Kontrollbereich wird, basierend auf dem erfolgreichen standortbezogenen Sicherheitsnachweis, zu Beginn des Ausbaus des URLs zum Endlager erstellt. Die Auffahrung der Einlagerungsstrecken erfolgt schrittweise je nach Abfallanlieferung. Kriterien für die Ausrichtung der Einlagerungsstrecken sind wasserführende Störungszonen sowie die Hauptspannungsrichtung im Gebirge. Um die temporär offenen Einlagerungsbereiche zu minimieren, erfolgen in den skandinavischen Konzepten die Auffahrung, Abfalleinlagerung sowie das Verfüllen und Abwerfen während der ganzen Betriebszeit parallel nebeneinander. Das schwedische Konzept sieht vor, dass zunächst ein Demonstrationsendlager aufgefahren wird, das etwa 5-10 % des gesamten Endlagerinventars aufnimmt [SKB 2006]. Wenn die abschließende Bewertung dieser Einlagerungen positiv ausfällt, soll das eigentliche Endlager errichtet werden.

In beiden skandinavischen Konzepten ist die Erstellung der Grubenräume mittels Bohr- und Sprengverfahren vorgesehen (Abbildung 6-3), so wie diese bereits im URL Äspö und in der Rock Characterization Facility ONKALO angewendet wurden. Entsprechend den Ergebnissen der Vorerkundung werden Anordnung und Länge der Sprengbohrungen sowie die Menge des Sprengstoffes exakt berechnet, damit das Ausbruchvolumen genau den Vorgaben entspricht und die Schädigung des umgebenden Gesteins minimiert wird. Die Sicherung der Streckenkontur erfolgt durch Anker und Stahlnetze. Während des Vortriebs werden wasserführende Störungszonen durch Zementinjektionen abgedichtet und brüchige Bereiche durch Spritzbeton oder einen Betonausbau stabilisiert. Der Streckenvortrieb beträgt etwa 6 m pro Tag für die Einlagerungsstrecken und ca. 4 m für die größeren Hauptstrecken. Um die Auffahrung zu beschleunigen, kann an mehreren Strecken gleichzeitig gearbeitet werden, wobei die Förderkapazität des Schachtes für das Ausbruchsmaterial der limitierende Faktor ist.



Abbildung 6-3: Erstellung von Sprengbohrlöchern in der Rock Characterization Facility ONKALO [Posiva]

Bevor die Entscheidung für das Untertagelabor in Tonstein (in Bure) fiel, wurde in Frankreich auch ein Endlagerkonzept für Granit entwickelt. Dieses orientierte sich weitgehend an den skandinavischen Konzepten [ANDRA 2005c]. Nach Erstellung der Infrastruktur sollte die genaue Lage der Einlagerungsbereiche in kluft- und störungsarmen Granitblöcken durch Erkundungsstrecken und -bohrungen ermittelt werden. Die Verbindungsstrecken mit den Einlagerungsbereichen sollten parallel in Gruppen angeordnet werden, um Explorations-, Bau-, Einlagerungs- und Verschlussaktivitäten gleichzeitig in jedem Einlagerungsmodul durchführen zu können. Bei der Streckenauffahrung wurde entsprechend den skandinavischen Erfahrungen das Bohr- und Sprengverfahren bevorzugt. Aufgrund der größeren Ausdehnung des französischen Endlagers ist für die mehrere Kilometer langen Verbindungs- oder Einlagerungsstrecken auch der Einsatz von Tunnelbohrmaschinen denkbar.

6.2.1.3 Erstellen von Bohrlöchern

Bei der Errichtung eines Endlagers sind Bohrlöcher zur Erkundung, als technische Bohrungen (z. B. für die gebirgsmechanische Überwachung), als Versorgungsbohrungen (z. B. zur Wetterführung) und als Einlagerungsbohrungen zu erstellen. Die vertikalen Einlagerungsbohrlöcher müssen einen Sicherheitsabstand zu wasserführenden Störungen einhalten. In den skandinavischen Endlagerkonzepten werden sie mit einem Durchmesser von 1,75 m und einer Länge von 8 m vertikal im Boden der Einlagerungsstrecken abgeteuft [Posiva 2007], [SKB 2006].

Vor dem Bohren der Einlagerungsbohrlöcher erfolgt zunächst eine Vorerkundung durch eine Kernbohrung. Anschließend kann das Bohrloch mit Hilfe einer modifizierten Mikrotunnelbohranlage, wie sie im Untertagelabor in Äspö und in der Rock Characterization Facility ONKALO erfolgreich getestet wurde, oder eines Flachbohrkopfes, wie er z. B. im Spezialtiefbau eingesetzt wird, erweitert werden [Posiva 2007] (Abbildung 6-4). Wesentliche, aber heute technisch beherrschbare Herausforderungen bei diesen Arbeiten sind der Vorschub des Bohrkopfes und die Entfernung des Bohrkleins. Wird bei der Erstellung des Bohrlochs eine wasserführende Störung angetroffen, so wird diese durch Zementinjektionen abgedichtet. Ist ein Abdichten nicht möglich, wird das Bohrloch aufgegeben. Alternativ wird von SKB auch die horizontale Bohrlochlagerung untersucht. Hierfür geeignete Bohr- und Einlagerungsgeräte werden im Untertagelabor Äspö erprobt [Autio & Kirkkomäki 1996].



Abbildung 6-4: Erstellung von Einlagerungsbohrlöchern in ONKALO [Posiva]

6.2.2 Ton und Tonstein

Die bergbauliche Gewinnung von Tonen ist auf relativ geringe Tiefen beschränkt. Allerdings ist Ton bzw. Tonstein ein wesentliches Nebengestein im Kohlebergbau und darüber hinaus im Deckgebirge vieler Bergwerke verbreitet, so dass insgesamt zahlreiche bergbauliche Erfahrungen mit Tonen und Tonsteinen vorliegen. Weitere Erfahrungen ergeben sich aus dem Tunnelbau. Weltweit wurden noch keine Endlager in Tonsteinen eingerichtet, doch diese Gesteine sind bevorzugte Wirtsgesteine in Belgien, Frankreich und der Schweiz und werden in diesen Ländern in Untertagelaboren (HADES, Bure, Mont Terri) untersucht. Bei der Errichtung dieser Untertagelabore konnten wichtige bergbautechnische Erfahrungen bezüglich der Erstellung von Grubenräumen in tonigen Wirtsgesteinen gesammelt werden.

6.2.2.1 Erstellen von Schächten und Rampen

Für die Schächte der beiden Untertagelabore Bure (Départements Meuse/Haute Marne, Frankreich) und HADES (Mol, Belgien) erfolgte das Schachtteufen mit dem Bohr- und Sprengverfahren. In Bure musste vor Beginn des Schachtteufens das Gefrierverfahren eingesetzt werden, um die 180 m mächtigen, lockeren und wasserführenden Deckgebirgsschichten zu stabilisieren. Das anschließende Schachtteufen erfolgte mit dem Bohr- und Sprengverfahren. Dabei wurde die Schachtwand sukzessive durch Felsanker und Spritzbeton stabilisiert. Mit Erreichen der Topfläche des Tonsteins wurden Ringfundamente für den weiteren Ausbau der Schächte errichtet. Der Ausbau erfolgte mit Stahlbetonringen, die gemäß dem Gebirgsdruck dimensioniert wurden. Die Konzepte für die Schächte der Endlagerbergwerke orientieren sich an den Erfahrungen, die bei der Errichtung der Untertagelabore gemacht wurden. In neueren Überlegungen wird im Endlagerkonzept in Frankreich zusätzlich zu den Schächten eine Rampe vorgesehen.

Das Schweizer Endlagerkonzept sieht einen Schacht und eine Rampe vor, wobei die Rampe zuerst aufgefahren werden soll [NAGRA 2002a]. Bei der Erstellung der Rampe kann auf umfangreiche Erfahrungen aus dem Tunnelbau zurückgegriffen werden. Der Opalinus-Ton wird im voraussichtlichen Endlagergebiet (Zürcher Weinland) von ca. 550 m mächtigen, z. T. grundwasserführenden Deckgebirgsschichten überlagert. Die Rampe soll im Bohr- und Sprengvortrieb mit systematischen Vorauserkundungen erstellt werden. Dabei werden wasserführende Gebirgsschichten durch Zementinjektionen abgedichtet. Sobald die Rampe den späteren Schachtfuß erreicht hat, wird von der Oberfläche aus in der Schachttachse eine Pilotbohrung abgeteuft, wobei wasserführende Bereiche durch Zementinjektionen abgedichtet werden. Nach Abschluss der Bohrung wird der Schacht mit einer Raise-Bohrmaschine von unten nach oben aufgefahren (Abbildung 6-1). Falls sich das Abteufen des Schachtes im Raise-Bohrverfahren aufgrund der geologischen Ergebnisse der Pilotbohrung als riskant erweisen sollte, ist alternativ ein Schachtteufen im konventionellen Bohr-/Sprengverfahren vorgesehen. Zur Stabilisierung der Schachtwand sowie der Rampenkontur sind in festen Gesteinsformationen einschalige Betonelemente mit Felsankern vorgesehen, in den wasserführenden Schichten ein zweischaliger Ausbau mit Wasserabdichtung und Felsankern. Für das Untertagelabor Mont Terri (Schweiz) wurde in einem Berghang ein Forschungstunnel im Opalinus-Ton parallel zu einem Straßentunnel aufgefahren, so dass hier kein Schacht abgeteuft werden musste.

6.2.2.2 Erstellen von Strecken und Kammern

Das belgische Endlagerkonzept sieht ein Streckennetz in ca. 230 m Tiefe in der Boom-Clay-Formation vor [Bastiaens et al. 2003]. Der Boom Clay ist ein wenig verfestigter, plastischer Ton, der aufgrund seiner hohen Verformbarkeit besondere Anforderungen an die Erstellung und Offenhaltung von Grubenräumen stellt. Um bei den Auffahrungen Störungen des Gebirges zu minimieren, wurden im Untertagelabor HADES die Streckenquerschnitte minimiert, die Strecken rasch aufgefahren und ausgebaut, der Ausbau eng an die Streckenkontur angelehnt und ein Ausbau mit hoher Steifigkeit verwendet [Bastiaens et al. 2003]. Die Auffahrung erfolgte mit einer Teilschnittmaschine mit parallelem Streckenausbau (Abbildung

6-5). Es wurden verschiedene Technologien für den Ausbau erprobt, wobei sich ein Ausbau aus keilförmigen Betonelementen als am zweckmäßigsten erwiesen hat (Abbildung 6-6). In einem zukünftigen Endlager kann ein derartiger Ausbau allerdings nur in bestimmten Abschnitten des Grubengebäudes eingesetzt werden, da die Keilblocktechnik keine Verbindungen mit Querschlägen zulässt.

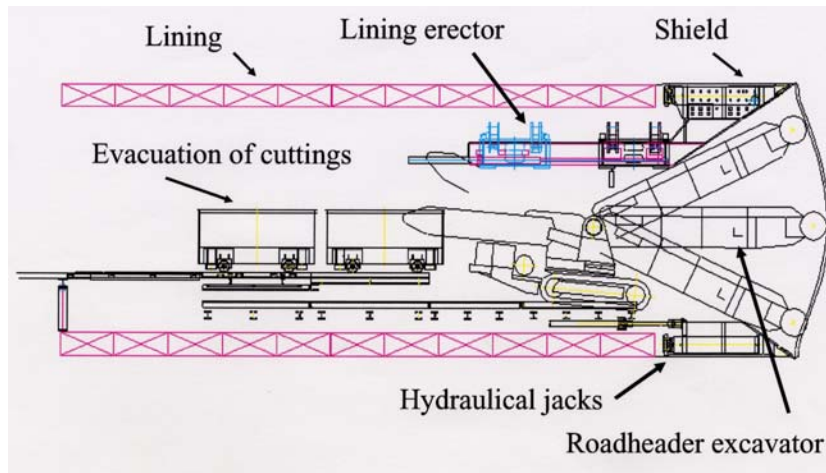


Abbildung 6-5: Auffahrung mit Teilschnittmaschine und parallelem Streckenausbau [Bastiaens et al. 2003].

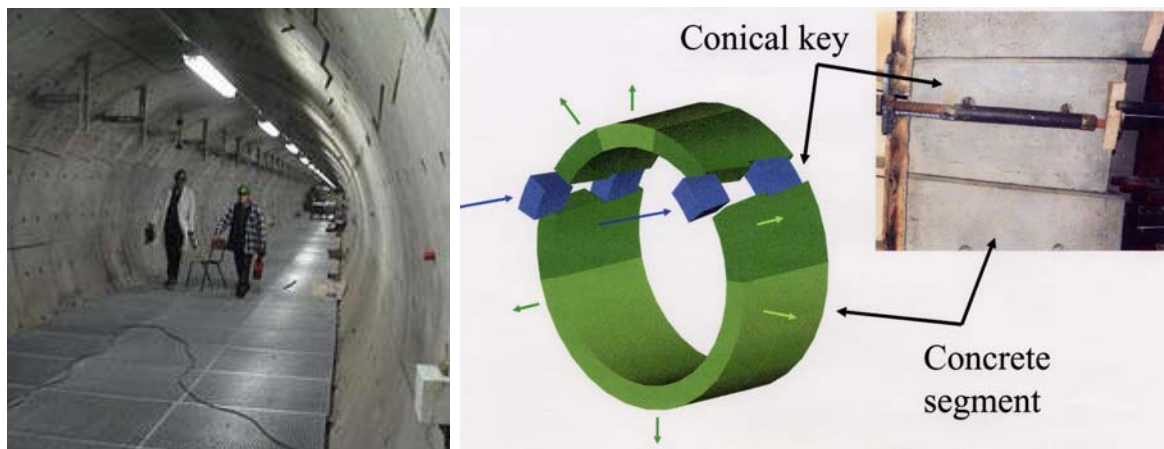


Abbildung 6-6: Betonausbau in Keilblocktechnik in der Verbindungsstrecke zwischen den Schächten des Untertagelabors HADES, Mol, Belgien [Bastiaens et al. 2003].

Das französische Konzept für die Errichtung eines Endlagers in Ton basiert im Wesentlichen auf den Erfahrungen im Untertagelabor in Bure [ANDRA 2005d]. Die als Wirtsgesteine vorgesehenen Tonsteine besitzen einen höheren Diagenesegrad und somit eine wesentliche höhere Druckfestigkeit als der belgische Boom Clay. Die Auffahrung der Strecken soll mit Teilschnittmaschinen erfolgen (Abbildung 6-7). Basierend auf geomechanischen Modellrechnungen werden die Strecken mit Gebirgsankern und Spritzbeton gesichert. Die Stärke des anschließend eingebrachten Ausbaus richtet sich nach den Anforderungen an die jeweilige Strecke. Hohe statische Anforderungen bestehen an die Streckenabschnitte, die nach Ab-

schluss des Betriebes als Standorte für Verschlussbauwerke vorgesehen sind. Hier wird stahlarmierter Spritzbeton und ein Betonausbau von 80 cm Stärke eingebracht.



Abbildung 6-7: Teilschnittmaschine, links verschiedene Schneidköpfe [NAGRA 2002a].

Das in der Schweiz vorgesehene Wirtsgestein Opalinus-Ton besitzt nach den Ergebnissen, die im Untertagelabor Mont Terri sowie in der Erkundungsbohrung Benken gesammelt wurden, felsmechanische Kennwerte, die für die bergbaulichen Arbeiten relativ günstig sind [NAGRA 2002a]. Die Auffahrung des Endlagerbergwerkes soll entweder mit Teilschnittmaschinen oder durch gebirgsschonendes Sprengen erfolgen. Die Sicherung der Haupt- und Verbindungsstrecken sowie der Infrastrukturräume wird mit Felsankern und glas- oder stahlfaserarmiertem Spritzbeton durchgeführt. Die Stärke des einschaligen Ausbaus richtet sich nach den grubenraumspezifischen Anforderungen. Nach geomechanische Modellrechnungen benötigen die Einlagerungsstrecken, die mit einer Tunnelbohrmaschine aufgefahren werden sollen, keinen Ausbau. Sie sollen aber aus Arbeitsschutzgründen mit Ankern und Stahlnetzen gesichert werden. Erfahrungen in Mont Terri haben gezeigt, dass das Abtrocknen der Streckenkontur durch den Wetterstrom eine zusätzliche Erhöhung der Standfestigkeit bewirkt.

6.2.2.3 Erstellen von Bohrlöchern

Die Wahl des Bohrverfahrens für die Erstellung von Bohrlöchern in Tonen bzw. Tongesteinen richtet sich nach den petrophysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins. Die unterschiedlichen Verfahren wurden durch Versuche in den Untertagelaboren erprobt. Generell ist zur Erkundung der geologischen Situation eine Vorbohrung zu erstellen, die im Anschluss auf den Enddurchmesser erweitert wird. Für plastische und wenig standfeste Tone ist vor allem das Schneckenbohrverfahren, ggf. kombiniert mit diskontinuierlichem Kernen geeignet. Tonsteine können meist mittels Rotary-Bohrverfahren komplett gekernt werden. Die Aufweitung der Bohrlöcher erfolgt in der Regel mit Schneckenbohrverfahren. Für das belgische Endlagerkonzept wurde alternativ zum Referenzkonzept der Streckenlagerung von Supercontainern auch die Bohrlochlagerung untersucht. Für dieses Konzept sind 8 m lange, vertikale Einlagerungsbohrlöcher in der Sohle der Zugangsstrecke vorgesehen

[ONDRAF/NIRAS 2001]. Diese Bohrungen werden bis zum Einbringen der Gebinde durch eine Stahlverrohrung stabilisiert.

Für das französische Einlagerungskonzept sollen lange, horizontale Bohrlöcher (Einlagerungszellen) beidseitig in die Stöße der Zugangsstrecken gebohrt werden. Nach vergleichenden Untersuchungen von ANDRA eignen sich für das Erstellen derartiger Bohrlöcher vor allem horizontale Bohrverfahren, die das Einbringen einer Verrohrung während des Bohrens ermöglichen [ANDRA 2005d] (Abbildung 6-8). Die 25 bzw. 30 mm starke Verrohrung besteht aus Carbonstahl. Die Erstellung von Einlagerungsbohrungen wird im Untertagelabor in Bure erprobt.

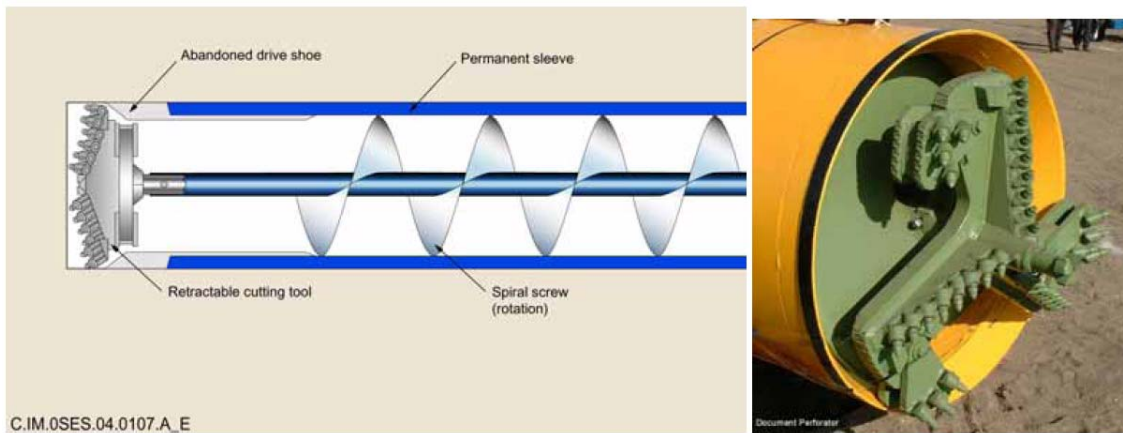


Abbildung 6-8: Bohrwerkzeug für die Erstellung der horizontalen Einlagerungsbohrungen für wärmeentwickelnde Abfälle [ANDRA 2005d]

Die obige Zusammenstellung der bergbautechnischen Erfahrungen und Planungen für die Errichtung von Endlagerbergwerken in Tonformationen in Belgien, Frankreich und der Schweiz zeigt die Bedeutung der jeweiligen Wirtsgesteine und des geologischen Umfeldes für die Wahl des am besten geeigneten Errichtungsverfahrens. Daher ist eine Aussage, inwieweit die oben beschriebenen Auffahrungskonzepte auf ein potentielles deutsches Endlagerkonzept in Ton angewendet werden könnten, z. Z. noch nicht möglich, da die genauen gesteinsmechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins nicht bekannt sind [Pöhler 2008].

6.2.3 Salzformationen

Das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente sieht eine Einlagerung im Salzgestein vor. Zu den für den Bergbau positiven Eigenschaften des Salzes gehört seine hohe Standfestigkeit, die keinen Ausbau des Schachtes im Salz oder der Grubenräume mit Stützkonstruktionen erfordert. In Deutschland liegen umfangreiche Bergbau-Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau aus mehr als 150 Jahren vor. Zudem konnten im ehemaligen Forschungsbergwerk Asse und im Endlager Morsleben wichtige Erfahrungen über die Nutzung von Salzgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gewonnen werden.

6.2.3.1 Schachtteufen

Für das Erkundungsbergwerk Gorleben wurden von 1986-1997 zwei Schächte mit Teufen von 933 m bzw. 843 m in das standfeste Steinsalz der Leine-Folge abgeteuft. Da das ca. 260 m mächtige Deckgebirge oberhalb des Salzstocks aus teilweise wasserführenden Lockersedimenten besteht, wurden die Schächte im Gefrierverfahren errichtet. Dabei wurde nach Erstellen des Gefrierkörpers zunächst in offener Bauweise ein ca. 21 m tiefer Vorschacht erstellt und mit Stahlbeton ausgebaut. Das Schachtteufen erfolgte in festeren Gesteinen mit Hilfe des Bohr-/Sprengverfahrens und in Lockersedimenten gebirgsschonend mittels Schacht-Kurz-Helix. Die Schächte wurden vom Deckgebirge bis ca. 90 m tief in die Salzformationen in verschiedenen Stufen ausgebaut (Abbildung 6-9). Unterhalb des Vorschachtes wurde die Schachtwandung auf Längen von 190 m bzw. 140 m mit Betonformsteinen ausgekleidet. Darunter wurde ein Aufhängefundament errichtet, von dem aus der Schacht bis zum Salzspiegel mit Stahlringen stabilisiert wird. Etwa 90 m unterhalb des Salzspiegels wurde das Innenausbaufundament errichtet und anschließend der Innenausbau aus 0,5-1,2 m starkem Stahlbeton mit einem Blechmantel, der mit Bitumen hinterfüllt wurde, hochgezogen. Im darunter liegenden Salinar ist der Schachtstoß mit Ankern und Maschendraht gegen Steinfall gesichert.

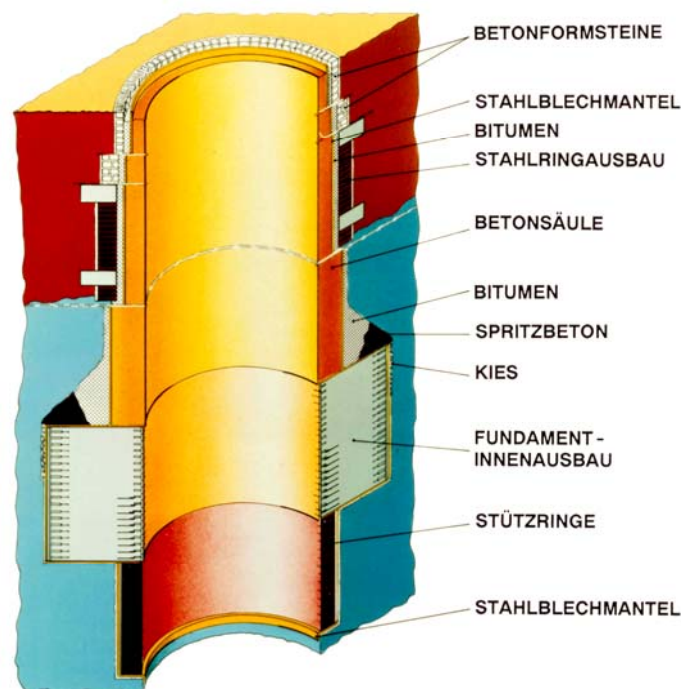


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des Ausbaus der Gorleben-Schächte (unmaßstablich)

6.2.3.2 Erstellen von Strecken und Kammern

Das am Standort Gorleben bestehende Erkundungsbergwerk soll im Anschluss an den erfolgreich geführten Langzeitsicherheitsnachweis in das spätere Endlagerbergwerk integriert

werden [Bollingerfehr et al. 2008]. So soll die derzeitige Erkundungssohle in 840 m Tiefe später ggf. als Abwettersohle und als konventioneller Infrastrukturbereich genutzt werden und die Einlagerungssohle soll mit einem eigenen Infrastrukturbereich 30 m unterhalb der Erkundungssohle angeordnet werden. Das Streckennetz muss der geologischen Struktur des Salzstocks und der aus der Erkundung bekannten Verbreitung des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge angepasst werden [Bollingerfehr et al. 2008]. Die von den Richtstrecken abgehenden Einlagerungsstrecken bzw. die Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbohrlöchern werden nach Bedarf aufgefahren und, sobald sie verfüllt sind, abgeworfen.

Vor dem Auffahren von Grubenräumen erfolgt eine Vorerkundung durch Bohrungen und EMR-Messungen, um notwendige Sicherheitsabstände zu Hauptanhydrit- und Kaliflözvorkommen einzuhalten. Für das Endlagerbergwerk ist prinzipiell ein gebirgsschonendes Vortriebsverfahren mit Voll- oder Teilschnittmaschinen vorgesehen. Vollschnittmaschinen erzielen relativ hohe Vortriebsgeschwindigkeiten und eignen sich für die Erstellung langer Verbindungsstrecken mit großen Kurvenradien, während Teilschnittmaschinen handlicher und flexibler sind sowie unterschiedliche Querschnitte profilgenau schneiden können. Bohr- und Sprengtechnik soll nur im Ausnahmefall eingesetzt werden. Entsprechend der Standsicherheit des Salzes ist ein Ausbau der Grubenräume nicht erforderlich, doch werden langfristig genutzte Räume durch Anker und Stahlnetze gegen Steinschlag gesichert. Da sich Salz langfristig plastisch verformt, ist es erforderlich, die Hohlraumkonturen regelmäßig mit Teilschnittmaschinen oder Firstenfräsen nachzuschneiden bzw. zu berauben.

6.2.3.3 Erstellen von Bohrlöchern

Das deutsche Referenzendlagerkonzept in Salz sieht die Einlagerung von HAW-Kokillen in vertikalen Bohrlöchern sowie die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in POL-LUX-Behältern vor, die in horizontalen Strecken eines Endlagerbergwerkes gelagert sind. In einem Forschungsvorhaben wird die technische Machbarkeit der Endlagerung von unter-schnittenen Brennstäben in sogenannten Brennstabkokillen in Bohrlöchern untersucht. Die entsprechenden Einlagerungsbohrlöcher sollen eine Länge von ca. 300 m und einen Durchmesser von mind. 0,60 m haben. Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde die technische Machbarkeit der Erstellung von 500 m tiefen Einlagerungsbohrungen mit einem Durchmesser von 60 cm in Trockenbohrtechnik bereits nachgewiesen [Steinberg 1993], so dass auf erprobte Technik zurückgegriffen werden kann. Standortspezifisch und unter Berücksichtigung von Ex-Schutzanforderungen muss dieses Verfahren jedoch noch verifiziert werden.

6.2.4 Technische Maßnahmen für den Endlagerbetrieb

Die technischen Maßnahmen für den Betrieb des Endlagerbergwerkes umfassen neben dem Transport- und Einlagerungssystem in allen Endlagerkonzepten auch die Installation der E-Technik, der Kommunikationstechnik, der Wettertechnik, der Sicherheits- und Überwachungstechnik (z. B. Strahlenschutz, Brandschutz), der Wasserhaltung – in wasserführenden Gesteinen – sowie das Abraumanagement. Die meisten dieser Maßnahmen sind Stand der

Technik, werden aber – in den kerntechnischen Bereichen – an die endlagerspezifischen Anforderungen gemäß dem kerntechnischen Regelwerk angepasst. Dies gilt insbesondere für die Sicherheits- und Überwachungstechnik sowie für die Wettertechnik und die Wasserhaltung. Für die Installation und den Betrieb der entsprechenden Systeme und Komponenten gelten hohe Qualitätsstandards, die auch eine regelmäßige Wartung und Instandhaltung einschließen. In allen Endlagerkonzepten wird die Auffahrung von Einlagerungsbereichen, die Einlagerung von radioaktiven Abfällen sowie das Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrungen bzw. -strecken als paralleler Prozess vorgesehen. Für die konzept-spezifischen Transport-, Einlagerungs-, Überwachungs- sowie Verfüll- und Verschluss-systeme wurden für alle Endlagerkonzepte bereits Planungen durchgeführt und z. T. auch schon Prototypen gebaut und erprobt. In den nachfolgenden Kapiteln wird darauf genauer eingegangen.

6.3 Transport- und Einlagerungssysteme

Transport- und Einlagerungssysteme sind wesentliche Elemente eines funktionstüchtigen und sicheren Endlagerbetriebs. Die technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen an diese Systeme bestimmen das entsprechende Design. Zu einem gewissen Maß kann für diese Systeme auf bereits vorhandene Technik aus anderen Bereichen der kerntechnischen Entsorgung (Konditionierung, Zwischenlagerung, Transport) und des Bergbaus zurückgegriffen werden. Dies gilt z. B. für den übertägigen Straßen- oder Schienentransport, für Kransysteme für die Handhabung, Schachtförderanlagen sowie untertägige Transporteinrichtungen. Diese Einrichtungen müssen ggf. den endlagerspezifischen Anforderungen, wie z. B. den Abmessungen und Gewichten der Endlagergebinde mit oder ohne Transportabschirmung, sowie – die Bergbauanlagen – den kerntechnischen Sicherheitsanforderungen angepasst werden. Weitgehende Neuentwicklungen sind in der Regel für die Einlagerungssysteme erforderlich, da für sie sehr spezielle Anforderungen gemäß dem Einlagerungskonzept gelten, z. B. horizontale bzw. vertikale Bohrlochlagerung oder Streckenlagerung. Ihre Planung und die Entwicklung und Erprobung von Prototypen erfordert einen weit fortgeschrittenen und sehr detaillierten Stand bezüglich der Standortcharakterisierung sowie der Endlager- und Endlagergebindeplanungen.

6.3.1.1 Transportsysteme

Grundlegende Anforderungen für die Transportsysteme leiten sich aus

- den Abmessungen und Gewichten der Endlagerbehälter und/oder der dafür vorgesehenen spezifischen Transportbehälter,
- dem Transport nach untertage über einen Schacht oder über eine Rampe und
- dem untertägigen Transport mit Hilfe von Rad-, Schienen- oder Luft-/ Wasserkissen-technik

ab. Die Entwicklung der Transportsysteme setzt weitgehend auf vorhandene und bewährte Technik (z. B. im Bereich des Bergbaus) auf, die an die endlagerspezifischen Anforderungen angepasst werden.

So sieht z. B. das deutsche Referenzkonzept für die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen in Salz die Verwendung selbstabschirmender Endlagerbehälter des Typs POLLUX vor. Diese Behälter haben ein Gewicht von 65 t und werden auf einem Plateauwagen mit einem Gewicht von 20 t transportiert. Da keine Schachtförderanlagen existierten, die für eine Nutzlast von 85 t ausgelegt waren, wurde von der DBE eine entsprechende Schachtförderanlage geplant, gefertigt und in einem Großversuch erfolgreich erprobt (Abbildung 6-10).

In vielen Endlagerkonzepten wird für den untertägigen Transport der Einsatz von Schienentechnik präferiert, wobei auf Bergbausysteme aufgebaut wird. Dazu werden die Transportwagen den Transportanforderungen für die Abfallbinde angepasst. Die entsprechenden Planungen sind bei den meisten Endlagerkonzepten z. Zt. auf das Konzeptstadium beschränkt. Lediglich für das deutsche Konzept wurden zwei Plateauwagen – einer für den POLLUX-Behälter und einer für den Transferbehälter mit BSK3-Kokille – entwickelt, gefertigt und im Großversuch erfolgreich erprobt. Ein dritter Plateauwagen-Typ für den Transport des Transferbehälters für die HAW-/CSD-C-Kokillen existiert nur als Konzept. Die Wagen für den Transport der Abfallbinde werden in allen z. Zt. bekannten Konzepten von elektrisch betriebenen Grubenloks gezogen.

ANDRA hat für den untertägigen Transport das Konzept eines radgetriebenen Fahrzeugs entwickelt, das voneinander unabhängig bewegliche Räder hat und somit über einen kleinen Wendekreis verfügt [ANDRA 2005c]. Ein Prototyp dieses Fahrzeugs existiert allerdings noch nicht.

Für den Transport von Abfallbinden über die Rampe nach untertage sind in allen Konzepten radgetriebene Transporter vorgesehen.

Als platzsparende Transportervariante wird im finnischen, schwedischen, im französischen und im belgischen Endlagerkonzept die Luft- bzw. Wasserkissentechnik vorgesehen [Petersson 2006c]. Diese Technik wird bereits verbreitet in der technischen Industrie für die Handhabung und den Transport schwerer Lasten eingesetzt. Für die Anwendung im Endlager sind die geringe Bauhöhe und die hohe Beweglichkeit, die z. B. ein Drehen auf der Stelle ermöglicht und somit an Abzweigungen/Kreuzungen keine großen Kurvenradien erfordert, wichtige Vorteile. Das Konzept kann sowohl für den übertägigen Transport wie auch den untertägigen Transport durch die Verbindungsstrecken und in den horizontalen Einlagebohrungen genutzt werden. Prototypen für diese Systeme wurden von ANDRA [ANDRA 2005d] und SKB [Petersson 2006c] getestet.

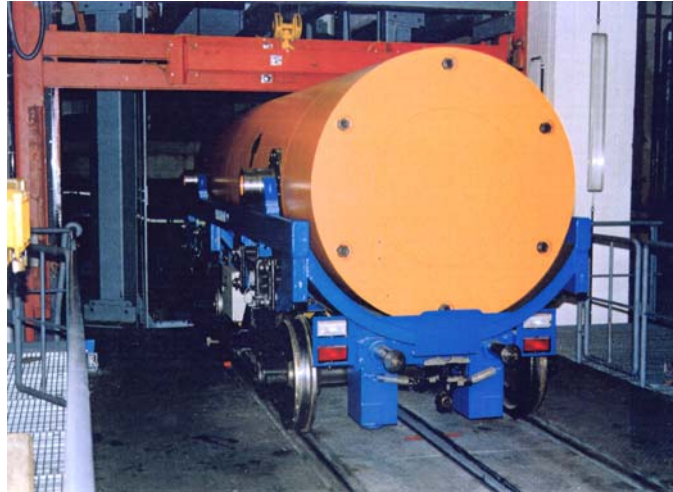


Abbildung 6-10: Demonstrationsversuch für den Schachttransport eines Plateauwagens mit POLLUX-Behälter, Deutschland

6.3.1.2 Einlagerungssysteme für die vertikale Bohrlochlagerung

Für alle Wirtsgesteinstypen gibt es Konzepte für die vertikale oder horizontale Bohrlochlagerung. Für die Endlagerung von Behältern mit ausgedienten Brennelementen in kurzen vertikalen Bohrlöchern wurden im Rahmen des KBS-3V-Konzeptes von SKB und POSIVA Prototypen von Maschinen für den Transport und das Einbringen von Puffermaterial in die Bohrlöcher sowie für den Transport und die Einlagerung der Endlagerbehälter entwickelt, gebaut und durch Versuche im Untertagelabor in Äspö erprobt [Pettersson 2006a]; [Pettersson & Widing 2003]. Transport- und Einlagerungsfunktionen sind bei diesem Konzept in einem Fahrzeug vereint (Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12). Das nach dem liegenden Transport erforderliche Schwenken der Transportabschirmung in eine vertikale Position erfordert entsprechende Abmessungen der Zugangsstrecke zu den Einlagerungsbohrungen sowie einen Bohrlochkeller oberhalb des Bohrlochs. Die bisher gebauten Prototypen entsprechen noch nicht in allen Aspekten, so z. B. im Strahlenschutz, den Anforderungen eines sicheren Endlagerbetriebes.

Ein modifiziertes Konzept hat ANDRA entwickelt. Dabei werden zwei Behälter zusammen mit dem Bentonitverschluss stehend in einer Transportabschirmung transportiert, so dass die Transportabschirmung über dem Bohrloch nur noch abgesenkt werden muss und dann durch eine Drehscheibe sowie ein Greifersystem nacheinander die beiden Behälter und der Bentonitverschluss in das Bohrloch abgesenkt werden können [ANDRA 2005c]. Dieses System wurde aber nicht weiterverfolgt.

ONDRAF-NIRAS hat für Tongesteine die Anwendung des KBS-3V-Konzeptes für das belgische Endlagerkonzept untersucht [ONDRAF/NIRAS 2001]. Überlegungen zum entsprechenden Transport- und Einlagerungsequipment sind aber über das Konzeptstadium nicht hinaus gekommen und orientieren sich weitgehend am skandinavischen Konzept.

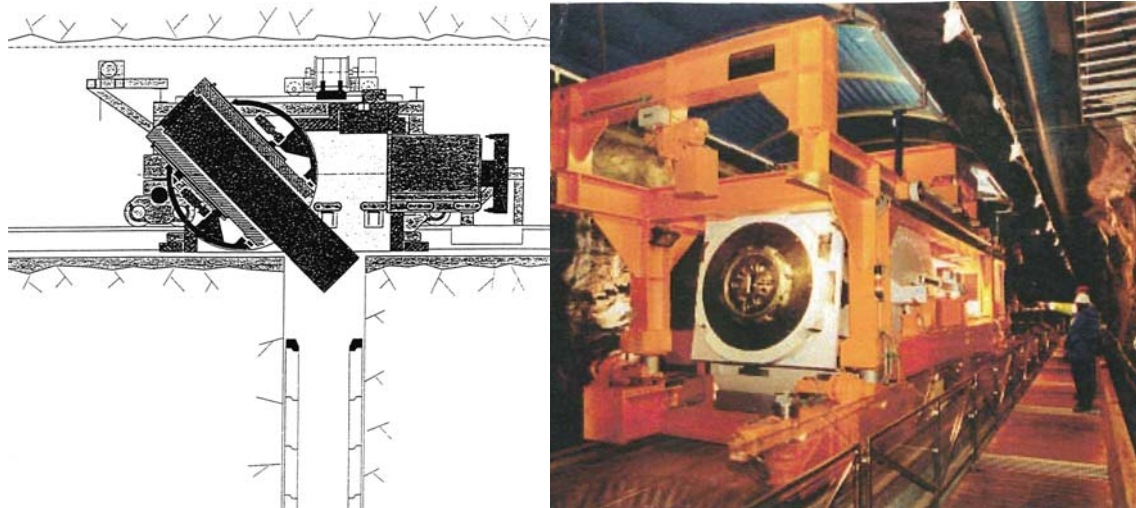


Abbildung 6-11: Einlagerungsmaschine für das KBS-3V-Konzept – Prinzipskizze einer Einlagerungsmaschine (links) und Prototyp (rechts)

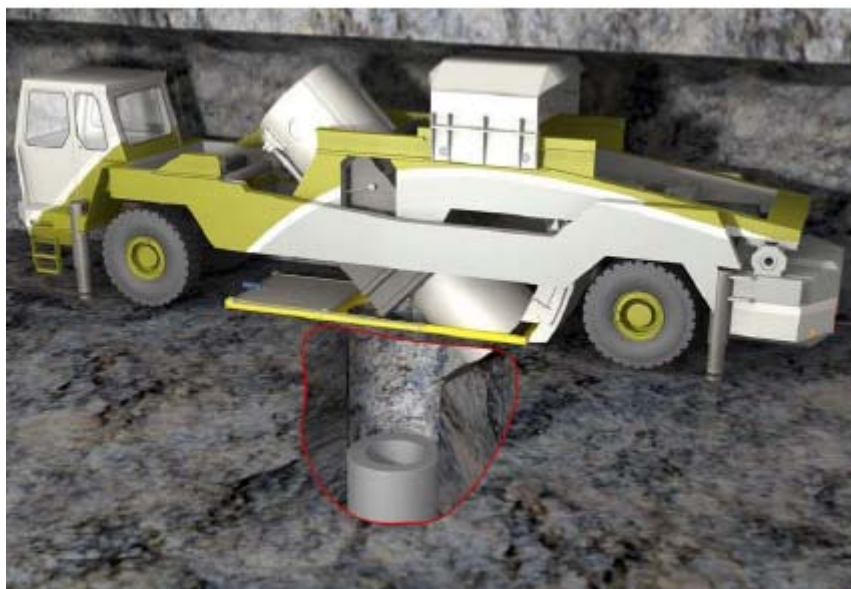


Abbildung 6-12: Von SKB (Schweden) neu entwickelte Einlagerungsmaschine auf Rädern für die vertikale Bohrlochlagerung

Das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung in Salz sieht die Einlagerung von verglasten radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in Kokillen in etwa 300 m tiefen vertikalen Bohrlochern vor [Bollingerfehr et al. 2008]. In einem Demonstrationsversuch wird die Einlagerung von Kokillen mit ausgedienten Brennelementen (BSK 3) in derartigen Bohrlochern untersucht [Filbert et al. 2008], [Fopp et al. 2008]. Für diesen Großversuch wurden alle für den Transport und die Einlagerung der BSK 3-Kokillen benötigten Geräte und Maschinen, wie Transferbehälter, Plateauwagen, Einlagerungsmaschine sowie die Bohrlochschleuse, entwickelt, in Originalgröße gebaut und im Dauereinsatz erprobt (Abbildung 6-13). Mit der Einlagerungsmaschine, die über dem Bohrloch platziert ist, wird der

Transferbehälter vom Plateauwagen abgehoben, dann in die Vertikale gedreht und auf die Bohrlochschleuse abgesetzt. Nach Öffnen der oberen Schleuse des Transferbehälters unter einer Abschirmhaube wird die Kokille mit einem Greifer angehoben. Anschließend werden die untere Schleuse des Transferbehälters und die Bohrlochschleuse gleichzeitig geöffnet und die Kokille in das Bohrloch abgelassen. Die vorgesehenen Abschirmungen und ein Unterdruck im Bohrloch gewährleisten permanenten Strahlenschutz während des Einlagerungsprozesses. Die Einlagerungsvorrichtung ist nach den kerntechnischen Anforderungen der KTA 3902 ausgelegt worden. Die technische Machbarkeit und insbesondere die Zuverlässigkeit der entwickelten Komponenten für die Bohrlochlagerung von BSK 3-Kokillen wurden durch mehr als 1000 Einlagerungsprozesse erfolgreich nachgewiesen.

In einer Variante zur Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern wurde untersucht, wie die Dimensionen der Strecke reduziert werden können. Dazu wurde eine Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in unter 45° geneigten Kurzbohrlöchern konzeptionell untersucht. Sowohl für die Erstellung der Bohrlöcher wie auch für die Einlagerung könnten hier kleinere Maschinen als bei dem oben dargestellten Konzept eingesetzt werden. Von einer solchen Einlagerungsmaschine existiert aber bisher nur ein Grobkonzept. Daraus resultierende Folgen für das Verfüll- und Verschlusskonzept wurden bisher ebenfalls nicht untersucht.

In einer Machbarkeitsstudie zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen in Deutschland wurden das gleiche Einlagerungskonzept für die Bohrlochlagerung und die gleichen Transport- und Einlagerungsgeräte wie für ein Endlager in Salz zugrunde gelegt [Pöhler 2008].

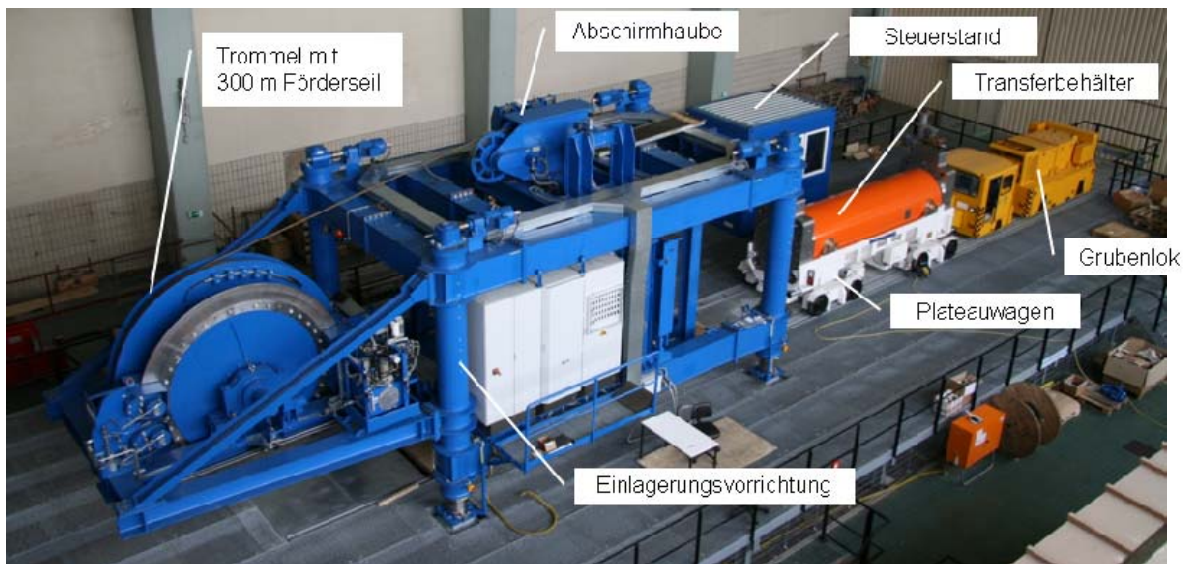


Abbildung 6-13: BSK 3-Einlagerungsmaschine mit Plateauwagen, Transferbehälter und Grubenlok am Versuchsstand in Landesbergen bei Nienburg

6.3.1.3 System für die Einlagerung in horizontalen Bohrungen und Strecken

Das finnische und das schwedische Einlagerungskonzept sehen als Alternative zu dem Referenzkonzept zwei Varianten für die horizontale Bohrlochlagerung vor: die Einlagerung von je einem Behälter in einer horizontalen Bohrung und die Einlagerung von mehreren Behältern in mittellangen horizontalen Bohrlöchern. Bei den dabei verwendeten Behältern handelt es sich um „Supercontainer“. Die kupferummantelten Endlagerbehälter werden hierbei mit einem zusätzlichen Bentonitpuffer umgeben [Pettersson 2006b]. Um die Streckenquerschnitte zu minimieren, sollen die Supercontainer mit einem Luft- oder Wasserkissensystem transportiert werden [Pettersson 2006c]. Dieses System ist mit der Einlagerungsmaschine verbunden und schiebt den Supercontainer schrittweise in das Bohrloch. Die Technik wurde im Untertage-labor in Äspö getestet (Abbildung 6-14).

Das französische Endlagerreferenzkonzept in Ton sieht die Einlagerung von mehreren Endlagerbehältern in langen, horizontalen Bohrlöchern (Einlagerungszellen) vor [ANDRA 2005d]. Für den Transport in den Bohrlöchern wird ein Luftkissensystem erprobt [Pettersson 2006c]. In der Einlagerungsposition werden die Transportbehälter unmittelbar an die Schleusen der Einlagerungsbohrlöcher angedockt. Entsprechend den Ergebnissen von Demonstrationsversuchen werden HAW-Gebinde mit einem Schieberoboter (Abbildung 6-15) und Gebinde für ausgediente Brennelemente mit einem Luftkissensystem (Abbildung 6-16) im Bohrloch positioniert. Das jeweilige Equipment wird bei der Beladung zusammen mit dem Endlagerbehälter im Transportbehälter eingebracht [Bosgiraud 2006]. Die prinzipielle Machbarkeit der Systeme wurde durch überträgige Versuche gezeigt [ANDRA 2005d].



Abbildung 6-14: Einlagerungsmaschine mit Wasserkissentechnologie für die Einlagerung in horizontale Bohrlöcher (Untertage-labor Äspö, Schweden) [Pettersson 2006c]

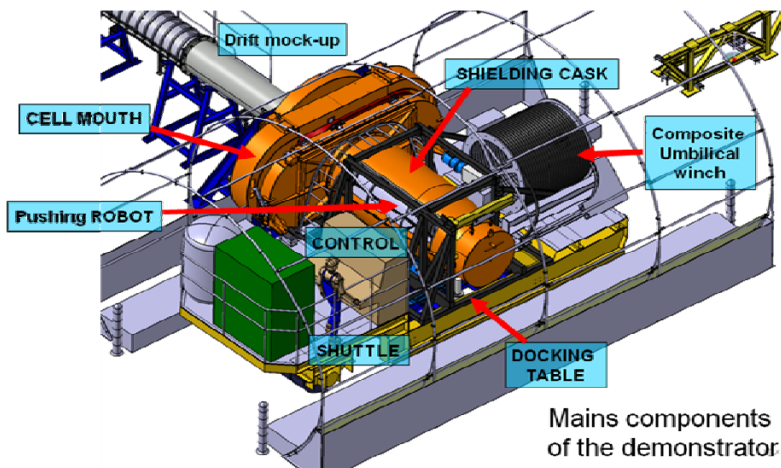


Abbildung 6-15: Versuchsanordnung zur Erprobung eines Schieberoboters für HAW-Kokillen im französischen Endlagerkonzept [ANDRA 2005d]

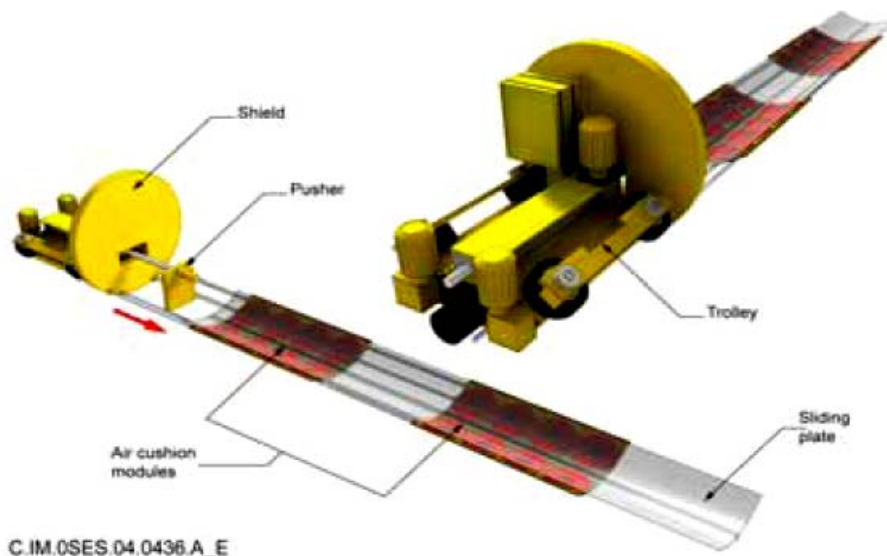


Abbildung 6-16: Schemazeichnung eines Luftkissensystems zur Einlagerung von Endlagerbehältern in horizontale Bohrungen (Frankreich) [ANDRA 2005d]

Das schweizerische Endlagerkonzept sowie das belgische Alternativkonzept sehen die Endlagerung in Einlagerungsstrecken im Ton vor [NAGRA 2002a], [ONDRAF/NIRAS 2001]. Im Schweizer Konzept sollen für den Transport und für die Einlagerung Schienenfahrzeuge eingesetzt werden. In der Einlagerungsstrecke ist es vorgesehen, dass der Einlagerungstrolley das Behälterauflager überfährt, den Behälter darauf ablegt und dann zurückgezogen wird. Für den Transport sollen Bergbaugeräte (Grubenlok, Portalwagen) genutzt werden. Die Entwicklung des Einlagerungstrolleys befindet sich noch im Konzeptstadium. Zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken nach Abschluss der Einlagerung wurden Demonstrationsversuche durchgeführt [Nold 2006].

Für das belgische Endlagerkonzept wurden zwei Alternativen für die Streckenlagerung untersucht [ONDRAF/NIRAS 2001]: ein Konzept sieht den Ausbau der Einlagerungsstrecke mit

Bentonit vor, wobei in der Mitte ein Führungsrohr eingebaut wird, in den der Endlagerbehälter geschoben wird. Bei diesem Konzept soll der Transport der Endlagerbehälter zu den Einlagerungsstrecken in einem Abschirmbehälter auf einem speziellen Transportwagen erfolgen. Das Einbringen der Behälter in das Führungsrohr soll mit einem speziellen Gabelstapler durchgeführt werden. Beide Maschinen sollen schienengebunden sein. Es wurden dazu noch keine Prototypen gebaut oder Demonstrationsversuche durchgeführt. Das zweite belgische Konzept sieht die Einlagerung von Supercontainern mit Zementpuffer vor, wobei der nach der Einlagerung verbleibende Streckenhohlraum mit Zement oder einem Bentonit / Sand-Gemisch verfüllt wird (Abbildung 6-17). Im Rahmen des ESDRED-Projektes wurden für das Supercontainer-Konzept Demonstrationsversuche zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken nach Abschluss der Einlagerung durchgeführt [Nold 2006].



Abbildung 6-17: Demonstrationsversuche zur Zementverfüllung einer Einlagerungsstrecke: Behältermodell mit zentralem Erhitzer (links) und Einschalung (Mitte) sowie Schnitt durch das Modell mit vollständiger Verfüllung der Hohlräume (rechts), Belgien [Bel 2006].

Das deutsche Referenzkonzept für die Direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in POLLUX-Behältern im Salz sieht die Einlagerung in horizontalen Strecken vor. Die technische Machbarkeit und die Genehmigungsreife dieser Technik wurde durch einen Demonstrationsversuch im Maßstab 1:1 nachgewiesen, wobei als Einlagerungsmaschine ein modifizierter Portalkran entwickelt wurde (Abbildung 6-18). Gemäß Einlagerungsablauf wird zunächst die Einlagerungsmaschine in der Einlagerungsstrecke positioniert. Anschließend wird der POLLUX-Behälter auf einem Plateauwagen unter die Einlagerungsmaschine gefahren, die dann den Behälter anhebt. Nach dem Zurückziehen des Plateauwagens kann dann der Behälter auf der Streckensohle abgelegt werden. Anschließend wird die Einlagerungsmaschine zurückgezogen und der Hohlraum um den Behälter kann mit Salzgrus verfüllt werden. Die vorgesehene vollständige Salzgrusverfüllung um einen eingelagerten POLLUX-Behälter wurde ebenfalls in einem Demonstrationsversuch erprobt. Die beschriebene Einlagerungstechnik ist bis zur Genehmigungsreife entwickelt und erprobt worden.

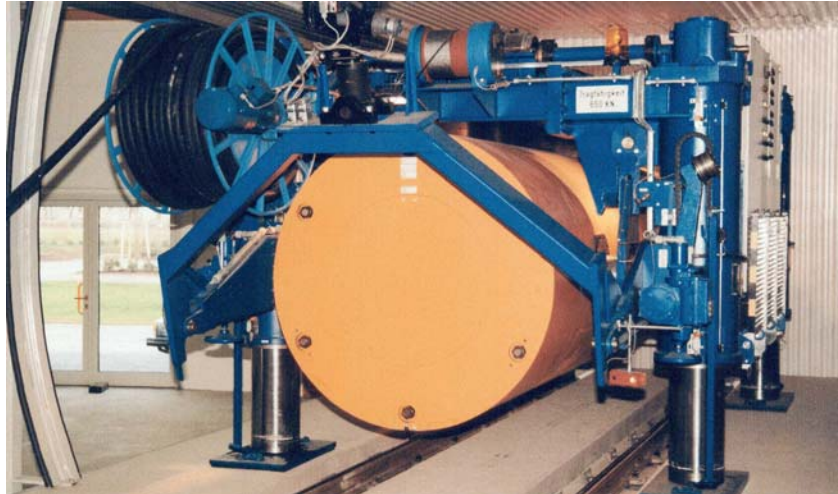


Abbildung 6-18: Demonstrationsversuch für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern in einem Endlager in Salz, Deutschland.

In Anhang 5 zu diesem Bericht sind weitere Informationen zum Bau und Betrieb von Endlagern zusammengefasst.

6.4 Überwachungsmethoden beim Endlagerbetrieb (Monitoring)

6.4.1 Einleitung und Zielsetzung

Hinsichtlich der Endlagerüberwachung gibt es derzeit noch keine international 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.

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 dargestellt [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 für eine Standortfindung sowie zur Endlagersicherheit leisten kann, diskutiert werden [EC 2004]. Dieser Bericht stellt den Abschlussbericht eines von der EC geförderten Forschungsprojektes dar, im Rahmen dessen 11 europäische Endlagerinstitutionen erste Schritte dafür erarbeitet haben, die Programme zur Endlagerüberwachung auf eine international gemeinsame Basis zu stellen. Insbesondere in der Entwicklung von Strategien zur Endlagerüberwachung sowie zu Zielsetzungen und Methoden zur Realisierung wurde ein erstes gemeinsames Verständnis entwickelt.

6.4.2 Definition und Grundprinzipien einer Endlagerüberwachung

Gemäß Definition [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, ergänzt durch den Zusatz, dass eine Überwachung auch Grundlage einer Entscheidungsfindung sein kann, in eine weitere Phase der Endlagerentwicklung einzutreten.

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 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 fünf allgemeine Schlüsselziele der Endlagerüberwachung formuliert:

- 1) Bereitstellung von Informationen, um im stufenweisen Endlagerprogramm von der Errichtung bis zur Schließung Managemententscheidungen fällen zu können,
- 2) Vertiefung des Verständnisses über das Systemverhalten als Grundlage für die Verifizierung der Sicherheitsanalyse,
- 3) Vertrauensbildung in der Gesellschaft,
- 4) Aufbau einer Umweltdatenbank,
- 5) Einhaltung der Safeguards-Anforderungen für spaltbares Material.

Ein Hauptaspekt der ersten drei Schlüsselziele ist die Erfassung der durch die Aktivitäten im 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 und die geochemische Störung aufgrund von chemischen Reaktion, die durch die Endlagererrichtung und den Endlagerbetrieb ausgelöst werden.

Neben den technischen und vertrauensbildenden Schlüsselzielen werden in [IAEA 2001] rein betriebliche Ziele der Endlagerüberwachung genannt, die bei jeder nuklearen Anlage erforderlich sind. Dazu zählt die Erfassung der radiologischen Belastung auf die Belegschaft und die Bevölkerung sowie die Erfassung der nicht-radiologischen Belastung auf die Umgebung (z. B. Absenkungen an der Tagesoberfläche, Änderung der Wasserqualität). Dabei gilt es, die nationalen Gesetze und Vorgaben einzuhalten. Ein weiteres betriebliches Ziel ist die Einhaltung der Vorgaben hinsichtlich der Lärm-, Staub- und Gasbelastung. 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 genannten Schlüsselzielen wurden in [Biurrun et al. 2001] spezielle Schutzziele aufgestellt, deren Erreichung durch geeignete Überwachungsmaßnahmen sichergestellt werden kann. Diesen Schutzzielen wurde eine Reihe von Aufgaben zugeordnet, die von einer Überwachung erfüllt werden müssen, damit eine Bewertung der Einhaltung der genannten Schutzziele erfolgen kann. Die Abbildung 6-19 zeigt in gelb markiert die Schutzziele und in blau markiert die damit verbundenen wesentlichen Überwachungsaufgaben im Überblick.

Bei der Entwicklung eines Überwachungskonzepts sollten sich laut [IAEA 2001] die Vorteile aus der Nutzung der Daten und die durch die Messung verursachten Nachteile die Waage halten. Folgende Nachteile sind möglich:

- 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.

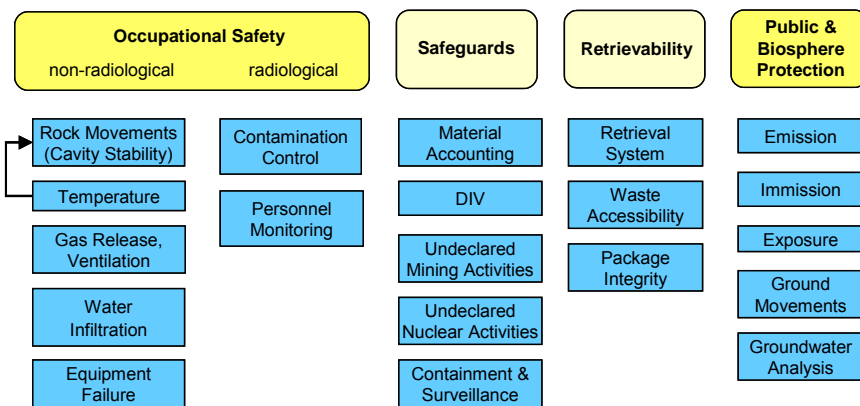


Abbildung 6-19: Überblick über die Schutzziele und die damit verbundenen Überwachungsaufgaben [Biurrun et al. 2001].

Eine übergreifende und umfassende Strategie zur Endlagerüberwachung ist derzeit noch nicht verfügbar, soll aber im Rahmen eines EC-Forschungsprojektes mit der Kurzbezeichnung *MoDeRn* unter Beteiligung von 15 europäischen Endlagerinstitutionen sowie Sandia (USA) und RWMC (Japan) entwickelt werden. Die bei der Endlagerüberwachung gewonnenen Messdaten werden als Grundlage für Managemententscheidungen, zur Vertrauensbildung, Einhaltung der Safeguards und Vertiefung des Systemverständnisses genutzt. Die

Messdaten sollen in einer Datenbank erfasst werden, die langfristig gepflegt wird und die auch zukünftigen Generationen als Daten- und Wissensbasis dienen soll.

6.4.3 Parameter zur 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 Erkenntnissen und dem Stand der Technik einfach verändert bzw. angepasst werden können. Für die Messparameter sollen bereits im frühen Stadium der Endlagerüberwachung Erwartungswerte festgelegt und adäquate Maßnahmen zur Gegensteuerung bei Nichteinhaltung der Erwartungswerte beschlossen werden [IAEA 2001].

Eine sehr allgemeine, als übergeordnet gedachte Zusammenstellung potenziell überwachungsrelevanter Parameter wurde von der [IAEA 2001] geliefert. Danach werden die zu messenden Parameter sechs verschiedenen Kategorien zugeordnet: (1) Zustand des Grubengebäudes, (2) Zustand der Abfallbehälter und des Versatzmaterials, (3) chemische Interaktion zwischen den eingebrachten Materialien (Versatz, Abfallbehälter, Stützbeton,...), dem Grundwasser und dem Wirtsgestein im Nahfeld, (4) chemische und physikalische Änderungen in der Geosphäre, (5) Bereitstellung einer Umweltdatenbank sowie (6) Nukleare Sicherheitsvorkehrungen (Safeguards).

Ferner sind gemäß den nationalen Gesetzen Messungen zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit durchzuführen. Dazu gehört die radiologische Überwachung (z. B. Emissionsüberwachung, Personendosimetrie), die nicht-radiologische Überwachung (z. B. Wasserqualität, Absenkungen an der Tagesoberfläche) sowie allgemeine Sicherheitsparameter (Lärm, Staub- und Gasbelastung).

6.4.4 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 [IAEA 2001]. Die nationalen Strategien für die Endlagerüberwachung verfolgen darüber hinaus spezifische Ziele, die maßgeblich vom nationalen Endlagerkonzept abhängen, und damit länderspezifische Lösungen darstellen. Neben dem Wirtsgestein haben noch andere nationale Faktoren des Endlagerprogramms Einfluss auf die Strategie zur Endlagerüberwachung [Mayer 2008]. Dies sind:

- (i) der rechtliche und regulatorische Rahmen,
- (ii) die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge bzw. in den benachbarten geologischen Formationen,
- (iii) die Menge und Art des radioaktiven Abfalls,
- (iv) die Abfallprodukte und Abfallgebände,
- (v) das Endlagerkonzept und die Endlagerplanung,

- (vi) das Wärmemanagement sowie
- (vii) die Erwartungen der Interessensvertreter.

Genauso wie die Endlagerprogramme selbst sind auch die Programme zur Endlagerüberwachung unterschiedlich weit fortgeschritten.

6.4.4.1 Frankreich

Endlagerkonzept

Im französischen Gesetz ist die reversible Endlagerung festgeschrieben. Die Rückholung der Abfälle soll für mindestens 100 Jahre möglich sein. Die Endlagerung ist flexibel und modular umzusetzen, so dass das Endlagerkonzept jederzeit modifiziert werden kann.

Regulatorischer Rahmen

Das Gesetz sieht ein Überwachungsprogramm von der Errichtung bis zur Schließung vor, des weiteren können einige Überwachungseinrichtungen nach der Schließung weiter betrieben werden [Bodenez et al. 2008]. Ein Überwachungsprogramm ist die Voraussetzung für die Rückholung der Abfälle. Ein Programm für die Endlagerüberwachung soll zusammen mit dem Antrag auf die Betriebsgenehmigung des Endlagers diskutiert, aufgestellt und spätestens im Jahr 2015 eingereicht werden.

Ziele der Endlagerüberwachung

Zusätzlich zu den von der IAEA formulierten Zielen ist das wichtigste Ziel der Endlagerüberwachung in Frankreich, die Rückholung der Abfälle zu gewährleisten.

Strategie

Die Endlagerüberwachung ist ein integraler Bestandteil des auf die Rückholbarkeit der Abfälle aufgebauten französischen Endlagerprogramms [ANDRA 2001]. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Endlagerüberwachung die Endlagersicherheit nicht beeinträchtigt. Es ist geplant, in verschiedenen Teilen des Endlagers Einlagerungskammern oder -strecken mit Messinstrumenten auszustatten und als Pilotanlagen zu überwachen.

Mit der Machbarkeitsstudie für ein Endlager im Tonstein bzw. im Granit wurde auch eine Machbarkeitsstudie für die Endlagerüberwachung vorgelegt [ANDRA 2005d]. Das derzeitige Endlagerüberwachungsprogramm gliedert sich in folgende Teile [Mayer 2008]:

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

Bisherige Aktivitäten

Seit 2007 arbeitet die ANDRA an Messsystemen für die Endlagerüberwachung, insbesondere für die Messung von Parametern an nicht mehr zugänglichen Orten. Aufbauend auf

erprobter Messtechnik sollen langlebige, 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 ist außerdem Koordinator des internationalen Projektes *MoDeRn*, das die Entwicklung und Harmonisierung von Endlagerüberwachungsstrategien und -programmen zum Ziel hat.

6.4.4.2 Schweiz

Endlagerkonzept

In der Schweiz wird das Konzept der *kontrollierten geologischen Langzeitlagerung* verfolgt, das die Einlagerung mit der Möglichkeit der Rückholbarkeit verbindet und eine intensive Überwachung des Endlagers vorsieht. 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. Dort 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 durchführbar sind. Die Überwachung, Kontrolle und Instandhaltung des Endlagers kann sich über mehrere Generationen erstrecken.

Regulatorischer Rahmen

Das Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 fordert, dass die Langzeitsicherheit des Endlagers unabhängig von Kontrollen gewährleistet ist. Das Gesetz sieht eine Überwachung in der Betriebsphase sowie eine ausgedehnte Beobachtungsphase vor der Schließung vor, die nach der Schließung fortgesetzt werden kann, wenn das die Bevölkerung wünscht. 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 das Endlager festgelegt werden. Nach der Einlagerung der Abfälle ist der Eigentümer verpflichtet, ein aktualisiertes Projekt für die Beobachtungsphase und für die Schließung vorzulegen. Nach ordnungsgemäßem Verschluss kann der Bundesrat eine weitere befristete Überwachung anordnen.

Ziele der Endlagerüberwachung

Die Endlagerüberwachung geht über die von der IAEA 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. Zu diesem Zweck sollen auch sämtliche international verfügbaren Informationen in regelmäßigen Abständen zusammengetragen und in Sicherheitsanalysen verarbeitet werden.

Strategie

Die Endlagerüberwachung ist an die Phasen des Endlagerprogramms gebunden und ändert sich entsprechend mit dessen Fortschreiten. Die Überwachung wird nur als ein Teil der Stra-

tegie gesehen, die aus dem Messprogramm, einem auf sinnvollen Kriterien basierenden Entscheidungsprozess sowie aus geeigneten Maßnahmen und Aktionen besteht, die im Falle eines unerwarteten und nicht akzeptablen Systemverhaltens ergriffen werden. Die Endlagerüberwachung kann jedoch den Sicherheitsnachweis nicht ablösen oder ersetzen und darf nicht die Langzeitsicherheit beeinträchtigen. 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.

Bisherige Aktivitäten

Die bisherige Erfahrung bei der Endlagerüberwachung beschränkt sich auf die Phase der Standorterkundung.

6.4.4.3 Finnland

Endlagerkonzept

Im finnischen Endlagerkonzept ist Granit das Wirtsgestein. Da Granit nur ein begrenztes Einschlussvermögen besitzt, kommt den langlebigen technischen Barrieren, insbesondere dem Endlagerbehälter und der Bentoniteinbettung, eine große Bedeutung zu. Das Konzept sieht auch die Rückholbarkeit der Abfälle vor.

Regulatorischer Rahmen

Mehrere allgemeine Gesetze machen die Endlagerüberwachung erforderlich oder enthalten Vorgaben für die Endlagerüberwachung. 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. Den Sicherheitsanforderungen für ein Endlager (Regierungsbeschluss 1999) zufolge ist das Endlager so zu planen, dass keine Überwachung des Endlagerstandorts erforderlich ist. 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. Das im Jahr 1994 in Kraft getretene Allgemeine Gesetz für die Einschätzung von Umwelteinwirkungen [EIA Act 486/1994] fordert, dass derjenige, der eine Einwirkung auf die Umwelt ausübt, auch ein Programm für die Überwachung dieser Einwirkung einzurichten hat. Das Wirtschaftsministerium hat festgelegt, dass die Grundsätze für ein Überwachungsprogramm vor der Einreichung des Antrags auf die Betriebsgenehmigung für das Endlager geklärt sein müssen. Gemäß dem neuen Entwurf der Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung werden zwei für die Endlagerüberwachung relevante Paragraphen vorgesehen:

- 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 Langzeitwirksamkeit der technischen Barriere zu gewährleisten.

Strategie

Das Endlager wird während der Errichtung, des Betriebs und wahrscheinlich auch in der Nachbetriebsphase überwacht, um zu bestätigen, dass es sicher betrieben wird und dass die radioaktiven Abfälle effektiv von der Biosphäre isoliert sind sowie zur Einhaltung der Safeguards-Anforderungen. Die Endlagerüberwachung in der Nachbetriebsphase soll von den nachfolgenden Generationen gestaltet werden und wird von den sozialen Rahmenbedingungen und der technologischen Entwicklung abhängen. Die Überwachung bestimmter Parameter für Safeguards-Belange wird in der Nachbetriebsphase fortgesetzt. Es ist geplant, das Endlagerüberwachungsprogramm bereits vor der Inbetriebnahme des Endlagers gemeinsam 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; [Posiva 2003]), das in bestimmten Kategorien bereits umfassend ist und in weiteren Kategorien noch vertieft werden muss.

Bisherige Aktivitäten

Die bei der übertägigen Standorterkundung erhobenen Daten sowie die verfügbaren älteren Erkundungsdaten wurden für die Beschreibung des Referenzzustandes herangezogen. Für die Überwachung während der Errichtung und des Betriebs des Untertagelabors ONKALO wurde das „**Olkiluoto Monitoring Programme**“ (OMO) ins Leben gerufen [Posiva 2003]. Die Überwachung erfolgt von der Oberfläche aus genauso wie untertage und umfasst die Bereiche Felsmechanik, Hydrogeologie und Hydrologie, Hydrogeochemie, Umwelt und Fremdmaterialien. Die Ergebnisse der Überwachung werden jährlich in den „**Posiva Working Reports**“ veröffentlicht.

Zwischen 2002 und 2003 wurde der nationale Safeguard-Ansatz entwickelt, der im Jahr 2003 wirksam wurde. Danach wird in der Errichtungsphase das Volumen der aufgefahrenen Hohlräume und das entsprechende Haufwerksvolumen überwacht. Die Betreibergesellschaft Posiva fertigt darüber eine umfassende Dokumentation an und ermöglicht Inspektionen in den Strecken und Hohlräumen.

6.4.4.4 Schweden

Endlagerkonzept

In Schweden wird das Endlager im Wirtsgestein Granit errichtet. Deshalb kommt der technischen Barriere, bestehend aus einem langlebigen Kupferkanister mit innenliegendem Stahlbehälter und einem gering durchlässigen Bentonitpuffer, eine große Bedeutung zu. Die Rückholbarkeit der Abfälle ist vorgesehen. 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.

Regulatorischer Rahmen

Die gesetzlichen Regelungen zur Überwachung von größeren Industrieanlagen gelten auch für Endlager. In den Sicherheitsvorschriften für alle Arten von nuklearen Anlagen heißt es zur Endlagerüberwachung unter anderem [SKI 2004]:

- die radiologische Endlagerüberwachung ist wichtig für den Fall, 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),
- der Endlagerbetrieb darf nicht durch die Endlagerüberwachung gestört werden,
- die Überwachung des Verhaltens von Teilen des Endlagers während des Betriebs stellt die Grundlage für die Einschätzung der Sicherheit des Endlagers dar,
- Sicherheitsindikatoren können eine Hilfe bei der Überwachung der nuklearen Aktivität sein,
- das Programm für den Umgang mit der Alterung und Zerstörung von Endlagerkomponenten sollte eine Überwachung der Alterungsmechanismen beinhalten.

Ziele der Endlagerüberwachung

Die übergeordneten nationalen Ziele der Endlagerüberwachung decken sich mit den von der IAEA formulierten Zielen [IAEA 2001]. Zusätzlich wird die Einhaltung nationaler und internationaler Richtlinien und Vorschriften als Ziel genannt. Auf Grundlage der übergeordneten Ziele werden detaillierte Überwachungsziele festgelegt, die im Rahmen der Planung der Endlagerüberwachung formuliert werden. Es ist vorgesehen, die Überwachungsziele regelmäßig zu überprüfen und zu aktualisieren.

Strategie für die Endlagerüberwachung

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 Überwachungsstrategie umfasst [Bäckblom & Almén 2004]:

- Ziele der Endlagerüberwachung
- Umfang der Endlagerüberwachung (zu messende Parameter)
- Identifizierung von Prozessen und Größen, die überwacht werden sollen
- Identifizierung der Methoden, die angewendet werden sollen
- Betreiben des Überwachungsprogramms

Bisherige Aktivitäten

Seit den 1970er Jahren wird eine generelle Wissensbasis über das Wirtsgestein Granit aufgebaut. Im Jahr 1986 hat SKB entschieden, das Äspö-Untertagelabor zu errichten, in dem umfangreiche Messprogramme laufen und auch Forschung zur Messtechnik betrieben wird. In den 1990er Jahren wurden in acht Gemeinden umfangreiche Machbarkeitsstudien erstellt. Seit 2002 wurden die zwei potenziellen Endlagerstandorte Forsmark und Oskarshamn erkundet. Ende 2009 fiel die Entscheidung für den Standort Forsmark.

6.4.4.5 Deutschland

Endlagerkonzept

Das Referenzendlagerkonzept in Deutschland sieht die Endlagerung in tiefen geologischen Salzformationen vor. Dazu wurden am ausgewählten Standort Gorleben detaillierte Untersuchungen übertägig und untertägig durchgeführt. Nachdem die Standorterkundung im Salzstock Gorleben durch ein Moratorium im Oktober 2000 ausgesetzt wurde, wurde auch die Möglichkeit der Endlagerung in anderen Wirtsgesteinen diskutiert.

Gesetzlicher Rahmen

Es gibt viele Gesetze bzw. technische Richtlinien, die bei der Endlagerüberwachung zu beachten sind; wie z. B. das Kernenergiegesetz (KEG), das Bundesberggesetz (BbergG), das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung – GesBergV). Die „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk vom 5.1.1983“ enthalten Regelungen zur Überwachung der Umwelt. Danach ist die Überwachung bis zur Stilllegung ein Instrument zur Gewährleistung der passiven Endlagersicherheit. Die Sicherheitskriterien werden derzeit überarbeitet, der neue Entwurf für die Sicherheitsanforderungen von BMU enthält mehrere Richtlinien zur Endlagerüberwachung. Der Kerntechnische Ausschuss (KTA) stellt Regeln für die betriebliche Sicherheit auf, die während des Betriebs eines Endlagers eingesetzt werden sollten. Diese Regeln geben einen gewissen Standard vor, sind jedoch nicht verbindlich. Die in dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) vorgesehenen, im Zusammenhang mit einem Endlager erforderlichen Überwachungsmaßnahmen werden in der Umweltverträglichkeitsstudie festgelegt.

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 in der Bevölkerung
- Safeguards.

Bisherige Aktivitäten

Die bisher durchgeführten Messkampagnen standen im Zusammenhang mit der Erkundung des Salzstocks Gorleben auf seine Eignung als Endlager. Weiterhin besteht eine umfangreiche Erfahrung bei der Überwachung des Endlagers Morsleben, in dem mittel- und schwachradioaktive Stoffe eingelagert werden.

6.4.5 Messtechnik und Messmethoden in der Endlagerüberwachung

Als Grundlage für die Erarbeitung eines Messprogramms müssen die technischen und funktionalen Anforderungen an die Messtechnik und das Messsystem ermittelt werden [EC

2004]. Die Anforderungen hängen vom nationalen Endlagerkonzept ab (Wirtsgestein, Rückholbarkeitsforderung, Abfallinventar, u. a., vgl. Kapitel 6.4.4) und variieren in den verschiedenen Phasen eines Endlagerprogramms. 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,
- 4) Überwachung unter Endlagerbedingungen,
- 5) Langzeitüberwachung von entfernten und schwer zugänglichen Gebieten.

Grundsätzlich sollte die Anwendbarkeit und die Verlässlichkeit der Messtechnik vor dem Einsatz in der Endlagerüberwachung nachgewiesen werden. Es muss im Einzelfall abgewogen werden, ob bewährte Messtechnik viel versprechender, neu entwickelter Messtechnik vorzuziehen ist. Die Instrumentierung hängt vom Messerfordernis und vom Ort der Messung ab. Die Dichte der Messinstrumente kann beim selben Messziel in verschiedenen Endlagerbereichen unterschiedlich ausfallen. Übt ein Messsystem einen signifikanten Einfluss auf das Endlagersystem aus, ist es im Sicherheitsnachweiskonzept explizit zu berücksichtigen.

Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels werden beispielhaft ausgewählte Messmethoden kurz beschrieben.

6.4.5.1 Mikroseismik und akustische Emission (AE)

In der Mikroakustik oder Mikroseismik wird die akustische Emission (AE), die bei Rissbildungen in Gesteinen entsteht, von Bohrlochsonden aufgenommen und ausgewertet. 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 Endlagerbergwerken 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.

Flächenhafte mikroseismische Untersuchungen wurden beispielsweise zur Charakterisierung des Kontaktbereichs eines Abschlussbauwerks sowie zur Überwachung von thermomechanischen Langzeitexperimenten im Forschungsbergwerk Asse eingesetzt. Mikroseismikmessungen im Tonstein werden zur Charakterisierung der Auflockerungszone angewendet.

6.4.5.2 Geoelektrik

Mittels geoelektrischer Messungen lassen sich Wassergehalt und Fließwege in gesättigten und ungesättigten Medien bestimmen. Sie eignen sich insbesondere für die Untersuchung von hochresistiven Salzgesteinen, in denen die vom Wassergehalt abhängigen Widerstandsvariationen besonders ausgeprägt sind. Damit lassen sich z. B. Feuchtezonen in Salzformationen nachweisen.

Geoelektrische Messungen eignen sich im Rahmen der Endlagerung zur:

- (i) allgemeinen Standortcharakterisierung,
- (ii) Erkundung des Wirtsgesteins (Schichtung und Störungszonen etc.),
- (iii) Charakterisierung von Verschlussbauwerken,
- (iv) Erkundung von geogenen und anthropogenen Anomalien,
- (v) Charakterisierung hydrogeologischer Verhältnisse sowie zur
- (vi) Erfassung der Ausbreitung von Grundwässern.

Die Anwendung geoelektrischer Methoden unter Tage ist auf Grund der räumlichen Gegebenheiten oft schwierig [Wieczorek & Rothfuchs 2006].

6.4.5.3 Verformungsmessungen (z. B. Konvergenz- und Extensometermessungen)

In der Konvergenzmessung wird der Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten in der Strecke gemessen. Damit können Gebirgsverformungen untertägiger Hohlräume bestimmt werden. An den Beobachtungspunkten werden Konvergenzbolzen angebracht. Die Messstrecken in Abbauen können vertikal oder horizontal sein. Die Messquerschnitte in den Strecken werden in der Regel mit jeweils acht, auf den Streckenumfang regelmäßig verteilten Beobachtungspunkten eingerichtet. Mit dieser Anzahl an Punkten ist eine hohe Genauigkeit und Messsicherheit zu erreichen. Die Längenänderung zwischen den Konvergenzbolzen 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. mit aufgesetztem Reflektor angebracht und dessen Verschiebung mit einem Theodoliten gemessen. Dabei lassen sich Messgenauigkeiten von +/- 1 mm erzielen, die den Ansprüchen der Standsicherheitskontrolle eines Tunnelbauwerkes hinreichend entsprechen.

Im Anhang 6 zu diesem Bericht sind weitere Informationen zum Thema Endlagerüberwachung zusammengetragen.

6.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

Der international erreichte Stand von Wissenschaft und Technik bei den Verfüll- und Verschlusskonzepten und -maßnahmen wird für die fortgeschrittenen Endlagerkonzepte in Belgien, Frankreich, Schweiz, Schweden, Finnland und Deutschland getrennt für die Wirtsgesteinstypen Tonstein, Kristallingesteine und Salz zusammenfassend dargestellt.

Wirtsgestein Ton

In Belgien, Frankreich und der Schweiz wurden Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager in tonigen Wirtsgesteinen entwickelt. Einige wirtsgesteinsspezifische Anforderungen sind für alle Konzepte gleich, so z. B. die Integrität der Behälter während der thermischen Phase (einige 100 bis wenige 1000 Jahre je nach Inventar) und ein Temperaturgrenzwert von 100 °C an der Kontaktfläche zwischen Endlagerbehälter und Bentonit respektive Tonstein.

Die begrenzte Mächtigkeit der Tonformationen erfordert in den o.g. Endlagerkonzepten horizontal ausgerichtete Endlagerkonzepte. In den entsprechenden Verfüll- und Verschlusskonzepten sind Verfüllungen aller Einlagerungsstrecken mit Puffermaterial, Streckenverschlüsse, Verfüllung der restlichen Grubenräume und Schachtverschlüsse vorgesehen. Bei allen Referenzkonzepten werden die Behälter in den Einlagerungsstrecken bzw. -bohrungen zum Schutz der Behälter und zur Rückhaltung freigesetzter Radionuklide von einem Puffermaterial, meist Bentonit, umschlossen. Im belgischen Supercontainer-Konzept wurde aus geochemischen Gründen Beton als Puffermaterial gewählt und als Teil der Behälterkonstruktion gewählt.

Aufgrund günstiger Materialeigenschaften ist Bentonit auch das bevorzugte Dichtmaterial für geotechnische Barrieren wie Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse. Diese Barrieren bilden eine hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall und verschließen potenzielle Wegsamkeiten bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz wieder vollständig verschlossen sind. Grundlagen für ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktionen werden z.Z. durch In-situ-Versuche und Laborexperimente geschaffen. Die bei den Sicherheitsnachweisen zugrunde gelegten Normalentwicklungen basieren auf der Entwicklung in der Vergangenheit und beschreiben durch Analogie- und Plausibilitätsschlüsse eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung des Endlagers. Dabei wird die Integrität der Behälter sowie der geotechnischen Barrieren unterstellt. Behälterdefekt, der Ausfall von Barrieren, Human Intrusion sowie andere ungünstige Entwicklungen werden als geringwahrscheinliche Entwicklungen betrachtet.

Die Forschungsarbeiten für die Verfüll- und Verschlusskonzepte konzentrieren sich bei allen drei Endlagerorganisationen auf das Verfüllen und den Verschluss der Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöcher. Bei der Verwendung eines Bentonitpuffers wird dieser entweder als hoch kompaktierte Bentonitblöcke oder als Bentonitpellets in die Einlagerungsstrecke eingebracht. Während für den Verschluss der Einlagerungsstrecken bereits recht detaillierte Planungen und Versuche vorliegen, sind für die Verfüllung und den Verschluss der anderen Grubenräume nur Grobkonzepte entwickelt worden. Strecken- und Schachtverschlüsse bestehen demnach aus Bentonitdichtelementen und Betonwiderlagern. Die restlichen Hohlräume werden mit Ton (Ausbruchmaterial) oder einem Ton/Sand-Gemisch verfüllt. Schwerpunkte der

Forschungsarbeiten bildeten umfangreiche Materialuntersuchungen an verschiedenen Bentonit-Typen. Weiterhin wurden die Herstellung von Bentonitpellets und -blöcken sowie Einbringtechniken untersucht und durch Großversuche erprobt. Weitere Materialuntersuchungen werden an Betonvarianten durchgeführt.

Kristallingestein

Die Endlagerplanungen der Endlagergesellschaften SKB (Schweden) und POSIVA (Finnland) sind ähnlich. Als Basis dient das schwedische KBS-3-Konzept, das eine Einlagerung im Kristallingestein in vertikalen Bohrlöchern vorsieht.

Kristallingesteine bieten eine hohe mechanische Standfestigkeit, die die Abfallgebinde während der Nachbetriebsphase schützt. Gleichzeitig sind die Gesteine aber häufig von wasserführenden Klüften durchzogen, so dass die Rückhaltefunktionen für die radioaktiven Inventare von technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten sind. Wesentliche Elemente des Sicherheitskonzeptes im Kristallingestein sind daher ein korrosionsresistenter Endlagerbehälter mit Standzeiten von wenigstens 100.000 Jahren sowie ein Bentonitpuffer um den Endlagerbehälter, um den Lösungszutritt zum Behälter zu vermeiden oder zu verzögern. Neben diesen beiden Maßnahmen sehen die Verfüll- und Verschlusskonzepte eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonit bzw. einem Bentonit/Gesteinsbruch-Gemisch sowie den Abschluss der Einlagerungsstrecken mit einem Verschlussbauwerk zu den Verbindungsstrecken hin vor. Für die Verfüllung des restlichen Grubengebäudes und der Schächte wurden bisher nur Grobkonzepte entwickelt. Im Prinzip sollen die für die Einlagerungsstrecken entwickelten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen auch hier eingesetzt werden. Für die Verfüllung und den Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher und -strecken wurde ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion entwickelt. Dieses Konzept basiert auf Sicherheitsfunktionen, Kriterien für die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen und Methoden für den Nachweis. Während SKB bereits einen ersten Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager am Standort Forsmark entsprechend dem internationalen Stand erstellt hat, hat POSIVA gerade erst mit der Erstellung eines derartigen Nachweises begonnen. Als Normalentwicklung wird unterstellt, dass alle Behälter und geotechnischen Barrieren entsprechend ihrer Auslegung funktionieren. Behälter- und Barrierendefekte werden als Alternativszenarien betrachtet.

Entsprechend ihrer Bedeutung für das Sicherheitskonzept bilden die Behälter und das Verfüllmaterial die Schwerpunkte für die Forschungsprogramme. Es wurde eine Reihe von Bentonitvarianten auf ihre Stabilität in den jeweils standortspezifischen hydrochemischen Milieus untersucht. Außerdem wird die Herstellung von Bentonitelementen sowie der Transport und die Einbringung dieser Elemente in In-situ-Versuchen erprobt. Zement, der für Widerlager von Barrieren, zur Abdichtung von Störungen und Rissen durch Injektionen sowie als Puffer beim Supercontainer-Konzept benötigt wird, soll einen möglichst niedrigen pH-Wert haben. Die entsprechenden Untersuchungen laufen noch.

Salzgesteine

Parallel zur ab 1979 erfolgten über- und untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben auf seine Eignung als Endlagerstandort, wurde umfangreiche Grundlagenforschung zum Wirtsgestein Steinsalz, zu Abfallarten und Endlagerbehältern sowie systemanalytische Arbei-

ten zu Endlagerkonzepten und Demonstrationsversuche zur Endlagertechnik durchgeführt. Das Referenzkonzept sieht die Streckenlagerung ausgedienter Brennelemente in POLLUX-Behältern und die Bohrlochlagerung von hochradioaktiven Abfällen in HAW-Edelstahlkokillen vor.

Das Schließungskonzept sieht die vollständige Verfüllung aller offenen Grubenhohlräume mit Salzgrus vor. Außerdem werden die Einlagerungsbohrlöcher, die Verbindungsstrecken zwischen den Schächten und den Einlagerungsbereichen sowie die Schächte durch Verschlussbauwerke abgedichtet. Es wurde zunächst ein deterministisches Nachweiskonzept für die Integrität der geotechnischen Barrieren entwickelt, bei dem die Kompatibilität mit den Anforderungen aus Langzeitsicherheitsberechnungen gezeigt werden soll.

Das Sicherheitsnachweiskonzept für ein Endlager in Deutschland wurde entsprechend dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt und berücksichtigt den Entwurf der neuen „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe“ [BMU 2009]. Im Hinblick auf die Unsicherheit von Langzeitprognosen wurden Dosisgrenzwerte durch Dosisrichtwerte im Sinn eines Sicherheitsindikators ersetzt sowie weitere Sicherheitsindikatoren abgeleitet. Dabei wird zwischen wahrscheinlichen und wenig wahrscheinlichen Entwicklungen unterschieden. Im Mittelpunkt des Nachweises steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere.

Die bisherigen Versuche zu Verfüll- und Verschlussmaßnahmen konzentrieren sich auf die Entwicklung der petrophysikalischen Eigenschaften von Salzgrus bei der Streckenverfüllung unter dem Einfluss der wärmeentwickelnden Abfälle und der Gebirgskonvergenz. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Für die Verschlussbauwerke in Einlagerungsbohrlöchern, Verbindungsstrecken und Schächten für ein HAW-Endlager wurden noch keine Referenzkonzepte festgelegt. Strecken- und Schachtverschlüsse werden Mehrkomponentenbauwerke mit Widerlagern und Dichtelementen sein. Das Design und die Baumaterialien wurden noch nicht festgelegt, so dass auch noch keine endgültigen Funktionalitätsnachweise erstellt werden konnten. Erfahrungen aus Planungen von Verschlussbauwerken für das Endlager Morsleben und die Asse können dabei genutzt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Kenntnisstand bei der Behälterentwicklung sowie bei den Einlagerungskonzepten einschließlich dem Verschluss der Einlagerungsstrecken/-bohrlöcher für die Konzepte in allen Wirtsgesteinen weit fortgeschritten ist. Schwerpunkte der Forschung waren dabei die petrophysikalischen Eigenschaften des Verfüllmaterials und die Wechselwirkungen mit dem Endlagergebäude. Ein besonders umfangreicher Kenntnisstand liegt über die verschiedenen Bentonit-Typen vor, die als Baumaterial für Dichtelemente in allen Wirtsgesteinen vorgesehen sind. Die entsprechende Einbringtechnik wird z. Zt. in Großversuchen erprobt. Zu den Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Teilen des Grubengebäudes liegen bisher für alle Wirtsgesteine nur Grobkonzepte vor. Entsprechende Erweiterungen der Forschungsprogramme werden in der Zukunft durchzuführen sein. Weitere Einzelheiten zum Bau und Betrieb, zu Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sowie zur Endlagerüberwachung für HAW-Endlager sind in den Anhängen 5, 6 und 7 zu diesem Bericht ausführlich beschrieben.

7 Genehmigungstechnische Aspekte

Im folgenden Kapitel werden für die ausgewählten Länder (Finnland, Schweden, Frankreich, Belgien, Schweiz und Deutschland) die genehmigungsrechtlichen Grundlagen und die zuständigen Organisationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt. Das jeweilige nationale kerntechnische Regelwerk legt die Grundlagen und die Rahmenbedingungen für die Planung und Umsetzung von Endlagern fest. Darin sind auch Ziele und Anforderungen aus sicherheitstechnischer und umweltpolitischer Sicht enthalten. Wichtige Aspekte des internationalen Regelwerks sind die kerntechnische Sicherheit, der Strahlenschutz, die Entsorgung radioaktiver Abfälle und die Haftung Dritter im Bereich der Kerntechnik.

Der international bestehende Konsens bezüglich der Sicherheitsprinzipien und -standards sowie der Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Stoffe im tiefen geologischen Untergrund ist in den entsprechenden Empfehlungen internationaler Fachorganisationen, wie der OECD-NEA, der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) und der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) formuliert. Hinzu kommen für die Mitgliedsländer der Europäischen Gemeinschaft die Vereinbarungen gemäß dem EURATOM-Vertrag bzw. die EG-Richtlinien. In den betrachteten Ländern wurden die entsprechenden internationalen Verpflichtungen bereits in das nationale Regelwerk übernommen oder die entsprechende Umsetzung befindet sich in der Vorbereitung. Insgesamt besteht somit bei den betrachteten Ländern ein weitgehend einheitliches Niveau im sicherheitstechnischen Bereich.

7.1 Finnland

Die für die Genehmigung von Endlagern wesentlichen Gesetze umfassen in Finnland das Kernenergiegesetz, das Strahlenschutzgesetz und das nukleare Haftungsgesetz. Diese Gesetze berücksichtigen die internationalen Standards im kerntechnischen Bereich. Eine bergrechtliche Genehmigung ist nicht erforderlich. Genehmigungsbehörde für kerntechnische Anlagen ist das Ministerium für Handel und Industrie (KTM), die Sicherheitsbewertung erfolgt durch die Behörde für Strahlen- und Nuklearsicherheit (STUK). Das Genehmigungsverfahren schließt eine Umweltverträglichkeitsprüfung und eine umfangreiche Beteiligung verschiedener Behörden, Umweltverbände und der Öffentlichkeit ein. In diesem Zusammenhang findet auch ein öffentliches Anhörungsverfahren statt, bei dem Einwander und Standortbehörden ihre Meinung darstellen können. KTM übermittelt eine Bewertung des Sicherheits- und Entsorgungskonzeptes sowie der Umweltverhältnisse an die Regierung. Voraussetzung für die Genehmigung ist auch die Zustimmung der Standortgemeinde. Falls dies gegeben ist und keine sicherheitlichen Aspekte gegen die Anlage sprechen, muss noch das Parlament der Genehmigung zustimmen. Neben der Standort- und Baugenehmigung muss nach Fertigstellung eine Betriebsgenehmigung beantragt werden. Diese wird nur für einen begrenzten Zeitraum erteilt. Für Folgegenehmigungen können die Genehmigungsbedingungen durch die Regierung geändert werden. STUK ist Aufsichtsbehörde für den Betrieb des Endlagers. Die Betreiber der finnischen Kernkraftwerke haben 1995 die Fachorganisation POSIVA OY gegründet und diese mit der Forschung und Entwicklung, dem Bau, dem Betrieb sowie der späteren Schließung von Endlagern beauftragt.

7.2 Schweden

Die Grundstruktur des schwedischen Atomrechts besteht aus dem Gesetz über kerntechnische Tätigkeiten (GKT), dem Umweltgesetzbuch, dem Strahlenschutzgesetz, dem Gesetz für zukünftige Aufwendungen für abgebrannte Brennelemente und dem Gesetz über die nukleare Haftung. Diese Regelwerke sind dem internationalen Standard im kerntechnischen Bereich angepasst. Der Betrieb eines Endlagers erfordert zwei Genehmigungen: eine nach GKT und eine nach dem Umweltgesetzbuch. Eine bergrechtliche Genehmigung ist nicht erforderlich. Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde ist die Schwedische Kerntechnische Aufsichtsbehörde (SKI), die bei ihrer Arbeit durch das Schwedische Strahlenschutzinstitut (SSI) unterstützt wird. Das Genehmigungsverfahren schließt eine Beteiligung verschiedener Behörden, Umweltverbände und der Öffentlichkeit sowie eine Anhörung ein. Zur abschließenden Bewertung wird der Genehmigungsantrag zusammen mit Stellungnahmen der Fachbehörden und der Standortgemeinde an die Regierung übermittelt. Falls die Anlage von übergeordnetem Interesse für die Allgemeinheit ist und keine anderen geeigneten Standorte vorliegen, kann ein Veto der Standortgemeinde aufgehoben werden. Um die gesetzlichen Anforderungen im Hinblick auf die Entsorgung von ausgedienten Brennelementen und langlebigen, radioaktiven Abfällen zu erfüllen, haben die schwedischen Kraftwerksbetreiber die „Schwedische Gesellschaft für Kernbrennstoffe und Abfallentsorgung“ (SKB) gegründet, die die erforderlichen FuE-Arbeiten durchführt und das Endlager errichten, betreiben und später schließen wird.

7.3 Frankreich

Die französische Gesetzgebung [Gesetz 1991], [Gesetz 2006] im Bereich der Kerntechnik leitet sich nicht aus einem Rahmengesetz ab, da sie sich sukzessive zur Entwicklung und zum Wachstum im Bereich der Atomenergie entwickelte. Viele relevante Regelungen finden sich daher in der allgemeinen Gesetzgebung wie dem Umweltgesetzbuch und dem Wasserrecht. Spezifische Regelungen bestehen im Hinblick auf die Haftung im Bereich der Kerntechnik, die Verwendung von Radioelementen, den Schutz und die Kontrolle von Kernmaterial und die Entsorgung radioaktiver Materialien und Abfälle, wobei die internationalen Sicherheitsprinzipien umgesetzt wurden. Es ist auch in Frankreich keine bergrechtliche Genehmigung für ein Endlager erforderlich. Für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers sind zwei Genehmigungserlasse des Industrieministers notwendig. Im Genehmigungsverfahren ist die Einhaltung sowohl der kerntechnischen wie auch der umweltrechtlichen Anforderungen nachzuweisen. Zuständige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde ist die „Abteilung für nukleare Sicherheit und Strahlenschutz (DGSNR)“ (zugeordnet dem Industrieministerium), die bei der Prüfung der Genehmigungsunterlagen durch ein Gremium von Sicherheitsexperten (CNE) und das Institut für Strahlenschutz und Nukleare Sicherheit (IRSN) unterstützt wird. Der Genehmigungsantrag wird auf einer öffentlichen Anhörung diskutiert. Die Bewertung von CNE, die Stellungnahmen beteiligter Ministerien und die Ergebnisse der Anhörung werden der „Interministeriellen Kommission für Kerntechnische Anlagen“ und dem Gesundheitsministerium zur Stellungnahme vorgelegt, bevor die Genehmigung dann vom Ministerpräsidenten erteilt wird. Zur Durchführung der FuE-Arbeiten sowie

zum Bau und Betrieb der Endlager wurde die Nationale Gesellschaft zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (ANDRA) gegründet.

7.4 Belgien

Das gesetzliche Regelwerk und die Behördenstrukturen haben sich in Belgien parallel zum Stand von Wissenschaft und Technik in der Kerntechnik entwickelt. Ein wesentlicher Grundpfeiler des kerntechnischen Regelwerks ist das Strahlenschutzgesetz, das ergänzt wird durch mehrere königliche Anordnungen, die die Genehmigungsverfahren für kerntechnische Einrichtungen, Strahlenschutz und Entsorgung radioaktiver Abfälle regeln. Spezielle bergrechtliche Regelungen für Endlager existieren nicht. Kerntechnische Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde ist die Staatliche Behörde für kerntechnische Kontrolle (AFCN), die dem Innenministerium zugeordnet ist. Für Endlager gilt ein zweistufiges Genehmigungsverfahren: die erste Genehmigung deckt die Errichtung und den Betrieb, die zweite die Inbetriebnahme nach der Fertigstellung und die Anlieferung von radioaktiven Stoffen ab. Das Genehmigungsverfahren schließt eine Prüfung und Bewertung der Genehmigungsunterlagen mit anderen Ministerien und Fachgremien, eine öffentliche Anhörung sowie Abstimmungen mit den Gemeinderäten am Endlagerstandort und mit der Provinzregierung ein. Die Genehmigungserteilung erfolgt durch den König in Form einer Anweisung, die durch den Innenminister gegengezeichnet wird, sowie durch eine Anzeige beim Wissenschaftlichen Rat der Behörde und der Europäischen Kommission. Per königlicher Anordnung wurde 1981 die Nationale Gesellschaft für radioaktive Abfälle und angereichertes Spaltmaterial (ONDRAF) eingerichtet, die u. a. für die Abfallkonditionierung, die Zwischenlagerung und die Endlagerung zuständig ist. ONDRAF wird vom Wirtschafts- und Energieministerium sowie dem Arbeitsministerium überwacht.

7.5 Schweiz

Das kerntechnische Regelwerk der Schweiz baut vor allem auf drei Gesetzen auf: dem Kernenergiegesetz, dem Strahlenschutzgesetz und dem Gesetz zur Haftung Dritter im Bereich der Kerntechnik. Diese Gesetze setzen auch die internationalen Standards des Strahlenschutzes und der Haftung um. Spezielle bergrechtliche Regelungen für Endlager existieren nicht. Genehmigungsinstanzen für Endlager sind der Bundesrat und das Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK). Als erster Genehmigungsschritt muss bei UVEK eine Bewilligung zur Standortuntersuchung eingeholt werden. Wenn die Standorteignung nachgewiesen ist, kann bei der Bundesenergiebehörde eine Rahmenbewilligung beantragt werden, die alle wesentlichen Projektaspekte abdeckt. Bewilligungsinstanz ist der Bundesrat. Das Genehmigungsverfahren schließt neben der Prüfung der Antragsunterlagen, die auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung umfassen, durch Fachbehörden und Sachverständige auch eine Abstimmung mit dem Standort-Kanton und den umgebenden Kantonen und Staaten sowie eine Auslegung von Antragsunterlagen und Gutachten für eine öffentliche Anhörung ein. Die Entscheidung des Bundesrates über den Genehmigungsantrag wird dann der Bundesversammlung zur Zustimmung vorgelegt. Nach Genehmigung der Rahmenbewilligung muss die Genehmigung für die Errichtung der Anla-

gen bei UVEK beantragt werden. Die Kantone und Fachbehörden werden wiederum beteiligt. Die Kantone haben aber in diesem Genehmigungsschritt kein Veto-Recht. Erforderliche Arbeiten können ggf. mit Hilfe des Enteignungsrechts durchgeführt werden. Eine weitere Genehmigung durch den Bundesrat ist erforderlich für den Betrieb und die Stilllegung eines Endlagers. Es ist nachzuweisen, dass die neuen Erkenntnisse der Bauphase die Standort-eignung, die Planungsgrundlagen und den Sicherheitsnachweis bestätigen und dass die Rückholung der Abfälle bis zur Schließung möglich ist. Die Entscheidung des Bundesrates stützt sich auf Bewertungen von UVEK und der Bundeskommission für die Sicherheit kerntechnischer Anlagen (CSN). Die Aufsicht über den Betrieb des Endlagers führen UVEK und CSN im Auftrag des Bundesrates durch. 1972 wurde von den Erzeugern radioaktiver Abfälle die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) gegründet, die in der Schweiz für die Entsorgung radioaktiver Abfälle verantwortlich ist.

7.6 Deutschland

In Deutschland stellen das Atomgesetz (AtG) und das Strahlenschutzvorsorgegesetz, die einer Reihe von Verordnungen konkretisiert sind, die grundlegenden kerntechnischen Regelungen dar. Spezielle Anforderungen an die Endlagerung sind in dem Entwurf der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (BMU 2009) spezifiziert. Eine atomrechtliche Genehmigung entfaltet eine Konzentrationswirkung auf viele andere für die Genehmigung relevante Rechtsgebiete, deckt aber das Bergrecht nicht ab. Daher sind in Deutschland für den Bau, Betrieb und Stilllegung von Endlagern zusätzliche bergrechtliche Genehmigungen erforderlich. Die atomrechtliche Genehmigung eines Endlagers erfolgt in einem Planfeststellungsverfahren, wobei die für Kerntechnik zuständige Landesbehörde Genehmigungsbehörde ist. Das Genehmigungsverfahren schließt eine Umweltverträglichkeitsprüfung und die Beteiligung von Fach- und Standortbehörden sowie der Bevölkerung ein. So bindet die Landesbehörde das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ein, das in Genehmigungsfragen durch die Reaktorsicherheitskommission (RSK), die Strahlenschutzkommission (SSK) sowie die Entsorgungskommission (ESK) beraten wird. Zusätzlich schaltet die Genehmigungsbehörde unabhängige Sachverständige ein. Die Festlegung des Standortes ist kein vorgeschriebener Genehmigungsschritt. Während andere kerntechnische Anlagen separate Genehmigungen für Bau, Betrieb und Stilllegung der Anlagen erfordern, deckt der Planfeststellungsbeschluss für Endlager alle Genehmigungen für die verschiedenen Phasen ab. Das Genehmigungsverfahren sieht ein Öffentlichkeitsbeteiligungsverfahren mit Auslegung von Antragsunterlagen, Einreichung von Einwendungen sowie Diskussion dieser Einwendungen auf einem Erörterungstermin vor. Falls grenzüberschreitende Auswirkungen nicht auszuschließen sind, so sind auch Behörden in Nachbarländern zu informieren und auf Wunsch am Verfahren zu beteiligen. Die Überwachung des Endlagerbetriebs erfolgt durch die Organisationseinheit „Eigenüberwachung“ des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS). 1979 haben der Bund und die Betreiber kerntechnischer Anlagen die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern mbH (DBE) als Betreibergesellschaft für die deutschen Endlager gegründet. Da der Bund nach Atomgesetz Anlagen zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten hat, bedient sich das für diese Aufgabe

zuständige Bundesamt für Strahlenschutz im Auftrag des Bundes zur Erfüllung dieser Aufgabe der DBE als sogenanntem Dritten nach AtG.

Resumee

Die Ausgestaltung der Genehmigungsverfahren variiert entsprechend der jeweiligen nationalen Gesetzgebung, der Behördenstrukturen und politisch-sozialer Strategien. In allen betrachteten sechs Ländern werden Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente im kerntechnischen Regelwerk hinsichtlich der gesetzlichen Anforderungen und des Genehmigungsverfahrens wie andere kerntechnische Anlagen behandelt. Eine Öffentlichkeitsbeteiligung ist, neben der Umweltverträglichkeitsprüfung, immer ein wesentlicher Aspekt. Endlagerspezifische Aspekte, wie die Standortwahl, bergbauliche Aspekte, der Langzeitsicherheitsnachweis etc., sind im untergeordneten Regelwerk festgelegt. Bergrechtliche Genehmigungen sind nur in Deutschland erforderlich. In vielen Ländern ist ein mehrstufiges Genehmigungsverfahren vorgesehen, in Deutschland ein einstufiges (Planfeststellungsverfahren).

Ausführliche Beschreibungen zu dem jeweiligen nationalen gesetzlichen Regelwerk und zu den endlagerspezifischen Verordnungen sind in Anhang 8 zu diesem Bericht zusammengestellt.

8 Vergleichende Gegenüberstellung und Bewertung des international erreichten Standes bei der Realisierung von HAW-Endlagerprojekten

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden – wie von der IAEA empfohlen – ausgehend von den Ergebnissen von Langzeitsicherheitsstudien und von Untersuchungen von natürlichen Analoga (z. B. Uranlagerstätten), aufgrund des langfristigen Isolationspotenzials weltweit tief lagernde geologische Formationen vorgesehen. Die Sicherheitsprinzipien und -standards sowie die Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Stoffe im Untergrund – entsprechend den Festlegungen der OECD-NEA, der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA) und der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) – werden in den betrachteten Ländern bei den Endlagerplanungen zu Grunde gelegt. Hinzu kommen für die Mitgliedsländer der Europäischen Gemeinschaft die Vereinbarungen gemäß dem EURATOM-Vertrag bzw. die EG-Richtlinien. In diesen Regelwerken sind die kerntechnische Sicherheit, der Strahlenschutz, die Entsorgung radioaktiver Abfälle und die Haftung Dritter im Bereich der Kerntechnik besonders bedeutsame Schwerpunkte. In den betrachteten Ländern wurden die entsprechenden Verpflichtungen bereits in das nationale Regelwerk übernommen oder die entsprechende Umsetzung befindet sich in der Vorbereitung. Insgesamt besteht somit bei den betrachteten Ländern ein weitgehend einheitliches Niveau im sicherheitstechnischen Verständnis und Regelwerk. Die wesentlichen Elemente des kerntechnischen Regelwerks sind: ein Kernenergiegesetz, ein Strahlenschutzgesetz und ein Haftungsgesetz. Weiterhin ist in allen Ländern bei der Genehmigung kerntechnischer Anlagen die Umweltgesetzgebung zu berücksichtigen (Umweltverträglichkeitsprüfung). Ein Erfordernis für zusätzliche bergrechtliche Genehmigungen für ein Endlager besteht nur in Deutschland. Die Ausgestaltung der Genehmigungsverfahren für HAW-Endlager variiert entsprechend der jeweiligen nationalen Gesetzgebung, der Behördenstrukturen und politisch-sozialer Strategien.

Die jeweiligen Endlagerkonzepte richten sich neben technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich aus der Art und Menge der Abfälle und gesetzlichen Bestimmungen ergeben, vor allem nach den geologischen Voraussetzungen und den Barriereigenschaften der für das Endlagerbergwerk ausgewählten Wirtsgesteine.

8.1 Standortauswahl und -untersuchung

Die Auswahl des Wirtsgesteins und von Standorten trägt im hohen Maße den nationalen territorialen, geologischen und sozialen Gegebenheiten Rechnung. Die Übertragung der für andere Länder entwickelten Konzepte und Vorgehensweisen auf Deutschland ist deshalb nur begrenzt möglich. Neben wirtsgesteinsunabhängigen geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (wie z. B. rezenter Vulkanismus und hohe seismische Aktivität) spielen aufgrund deutlicher Unterschiede in den endlagerrelevanten Eigenschaften gesteinspezifische Standortanforderungen bzw. Auswahlkriterien eine wichtige Rolle. So z. B. regelt die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine das Auswahlkriterium Mindestfläche. Die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz im Vergleich zum Ton/Tonstein ist dafür verantwortlich, dass Endlagerbergwerke im Steinsalz einen deutlich geringeren Platzbedarf haben als HAW-Endlager in Tonformationen.

Eine Analyse der weltweit praktizierten Vorgehensweisen und der bei der Standortsuche genutzten Entscheidungskriterien offenbart, dass die Auswahlprozedur häufig sehr pragmatisch und unter Zugrundelegung streng wirtschaftlicher Überlegungen durchgeführt wurde. So z. B. legten Länder wie Finnland, Schweden, Kanada oder Russland noch vor Beginn oder in einer sehr frühen Phase des Auswahlverfahrens fest, dass die Endlagerstandorte in unmittelbarer Nähe von bereits bestehenden kerntechnischen Anlagen zu errichten sind. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen beschränkte sich die Aufgabe des Standortauswahlprozesses auf die Suche nach einem geeigneten, den Langzeitsicherheitsrichtlinien entsprechenden Standort in einem lokal begrenzten, vor Beginn des Auswahlprozesses vorgegebenen Raum. In vielen Fällen erfolgte die endgültige Standortfestlegung nicht auf der Grundlage eines „objektiven“, kriteriengestützten Vergleichs von alternativen, über das gesamte Landesterritorium verteilten Standorten, sondern wie z. B. in Frankreich oder in den USA durch politische Entscheidungen.

8.2 Endlagerkonzeptentwicklung

Die Entwicklung von Endlagerkonzepten bzw die Errichtung derartiger Anlagen befindet sich in den einzelnen Ländern auf sehr unterschiedlichem Niveau. Gründe dafür sind neben den jeweiligen Finanzierungsmöglichkeiten für entsprechende Vorhaben sowie der zum Teil erst in den letzten Jahren entstandenen Notwendigkeit (osteuropäische Staaten) auch politische Entscheidungen zur Entsorgungsstrategie. Unterschiede bestehen vor allem zwischen Ländern, in denen die Kernenergie seit vielen Jahren etabliert ist (z. B. USA, Frankreich, Großbritannien), auch wenn ein Ausstieg festgelegt ist oder in Erwägung gezogen wird (z. B. Deutschland, Belgien, Schweden), und den Ländern, die nur einzelne KKW betreiben oder sich hinsichtlich der Kernkraft noch in der Entwicklung befinden. Der erreichte Entwicklungsstand für Endlager reicht von der Erarbeitung konzeptioneller Pläne über umfangreiche geologische, hydrogeologische, seismische u. ä. Erkundungen bis hin zu terminlichen Festlegungen, bis wann Untertagelabors und schließlich Endlager betriebsbereit sein sollen. Zum Teil sind bereits Endlagerstandorte ausgewählt und Arbeiten zur Errichtung angelaufen. In Deutschland wurde von Beginn der ersten Endlagerplanungen Salz als Wirtsgestein favorisiert. Die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit, das Kriechverhalten und damit das Isolationspotenzial sowie die mehr als 150-jährigen Erfahrungen im Salzbergbau waren die entscheidenden Gründe dafür. Grundlagenforschung und Endlagerkonzeptionen wurden seit Mitte der 1960er Jahre zielgerichtet durchgeführt, um die Voraussetzungen für eine standort-spezifische Endlagerung zu erarbeiten. Mit der „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ liegen in Deutschland seit 1998 Planungen in Vorkonzepttiefe vor, die für Steinsalz in keinem weiteren Land auf vergleichbarer Detaillierungsstufe existieren. Darin sind auch die Ergebnisse der erfolgreich durchgeführten Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente berücksichtigt. Das Enlagerkonzept in Salz unterscheidet sich von denen in Magmatit und in Ton wesentlich hinsichtlich der vorrangigen Barrierenfunktion des Wirtsgesteins und damit auch deutlich hinsichtlich der Auslegung technischer und geotechnischer Barrieren. Für Steinsalz kann auf Grund seiner isolierenden Eigenschaften auch für Zeiträume, in denen die technischen und geotechnischen Barrieren nicht mehr wirksam sein müssen, ein Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden.

8.3 Endlagererrichtung

Die Erfahrungen, die bei der Errichtung von Endlagerbergwerken für radioaktive Abfälle in Kristallingesteinen gesammelt wurden, sind für die geologischen Verhältnisse in Deutschland wenig nutzbringend. Nach Untersuchungen der BGR gibt es in Deutschland keine Regionen mit geeigneten Kristallinvorkommen.

Die bergbauliche Gewinnung von Tonen ist auf relativ geringe Tiefen beschränkt, doch ist Ton bzw. Tonstein ein wesentliches Nebengestein im Kohlebergbau und darüber hinaus im Deckgebirge vieler Bergwerke verbreitet, so dass insgesamt zahlreiche bergbauliche Erfahrungen mit Tonen und Tonsteinen vorliegen. Weitere Erfahrungen ergeben sich aus dem Tunnelbau. Weltweit wurden noch keine Endlager in Tonsteinen eingerichtet, doch sind diese Gesteine bevorzugte Wirtsgesteine in Belgien, Frankreich und der Schweiz und werden in diesen Ländern in Untertagelaboren (Hades, Bure, Mont Terri) untersucht. Bei der Errichtung dieser Untertagelabore konnten wichtige bergbautechnische Erfahrungen bezüglich der Erstellung von Grubenräumen in potenziellen Wirtsgesteinen gesammelt werden. Recherchen der BGR weisen auf Tonsteinregionen in Deutschland hin, die grundsätzlich geeignet erscheinen für ein HAW-Endlager. Konzeptionelle Untersuchungen für ein entsprechendes Endlager zeigten, dass dieses prinzipiell herstellbar und zu betreiben ist. Der Aufwand hinsichtlich Errichtung und insbesondere wegen des massiven Streckenausbaus und der thermisch bedingten großen Flächenausdehnung ist im Vergleich zu einem Endlager in einer Salzformation nach ersten Schätzungen um fast eine Größenordnung höher (10-facher Flächenbedarf).

In Deutschland liegen seit über 150 Jahren umfangreiche Bergbau-Erfahrungen für Salzformationen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau vor. Zudem liefert das Endlagerbergwerk Morsleben wichtige Erfahrungen über die Nutzung von Salzgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Zu den für den Bergbau positiven Eigenschaften des Salzes gehört seine hohe Standsicherheit, die einen Ausbau des Schachtes oder der Grubenräume in diesen Schichten meist überflüssig macht.

8.4 Endlagerbetrieb und -überwachung

Für die technischen Systeme eines Endlagerbetriebes kann z. T. auf bereits vorhandene Technik aus anderen Bereichen der kerntechnischen Entsorgung (Konditionierung, Zwischenlagerung, Transport) und des Bergbaus zurückgegriffen werden. Dies gilt z. B. für den übertägigen Straßen- oder Schienentransport, Kransysteme für die Handhabung von Abfallgebänden, Schachtförderanlagen sowie untertägige Transporteinrichtungen. Diese Einrichtungen müssen ggf. den endlagerspezifischen Anforderungen, wie z. B. Abmessungen und Gewichte der Endlagergebände mit oder ohne Transportabschirmung, sowie – die Bergbauanlagen – den kerntechnischen Sicherheitsanforderungen angepasst werden. Weitgehende Neuentwicklungen sind in der Regel nur für die Einlagerungssysteme erforderlich, da für sie sehr spezielle Anforderungen gelten, z. B. Einlagerung in horizontale bzw. vertikale Bohrlöcher. Für alle Wirtsgesteinstypen gibt es dafür bereits weit entwickelte und zum Teil erprobte technische Systeme. Für das skandinavische KBS-3V-Konzept (Einlagerung ein-

zelter Behälter in vertikale Bohrlöcher im Granit) wurde ein System entwickelt, das Transport- und Einlagerungsfunktionen vereint. Von dieser Maschine wurde auch ein Prototyp gebaut und durch Versuche im Untertagelabor in Äspö erprobt. Für das französische Konzept wurde ein Einlagerungssystem zum Schieben von Endlagerbehältern in verrohrte, horizontale Bohrungen eines Endlagers in Tonstein entwickelt und demonstriert.

Das deutsche Konzept für die Einlagerung von Endlagerbehältern in tiefe, vertikale Bohrlöcher eines Endlagers in Salz wurde bereits in einem übertägigen Demonstrationsversuch erprobt. Dafür wurden alle erforderlichen Systeme und Komponenten, wie die Transportabschirmung, der Portalwagen, die Einlagerungsmaschine sowie die Bohrlochschleuse, entwickelt, gebaut und erfolgreich erprobt. Dieses Einlagerungssystem könnte prinzipiell auch in anderen Wirtsgesteinen, wie z. B. in Ton, eingesetzt werden.

Die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern mit ausgedienten Brennelementen im Salz ist das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Die technische Machbarkeit und die Sicherheit und Zuverlässigkeit dieses Systems wurden durch einen Großversuch ebenfalls bereits nachgewiesen.

Alle Länder, die eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen verfolgen, sind sich einig über die Bedeutung der Endlagerüberwachung für die Beschreibung des Referenzzustands, für das Fällern von Entscheidungen in stufenweisen Endlagerprogrammen, die Sicherstellung der Betriebssicherheit, für Safeguards und die Überprüfung von Modellannahmen. Leicht unterschiedliche Auffassungen bestehen jedoch bei der Bewertung der Rolle der Endlagerüberwachung hinsichtlich des Nachweises der Endlagerentwicklung und der Langzeitsicherheit [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. Für die Überwachung in einer über mehrere Jahrzehnte dauernden 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 und der Beständigkeit der Messsysteme in der Endlagerumgebung. Die gegenwärtig laufenden Endlagerüberwachungsprogramme sowie die Planungen für zukünftige Überwachungen orientieren sich an dem jeweiligen nationalen Endlagerprogramm. Die Rolle der Überwachung innerhalb des Endlagerprogramms und innerhalb des Sicherheitsnachweises ist unterschiedlich. Entsprechend ist der Umfang der Messungen verschieden. Es besteht jedoch Konsens darin, dass der Aufwand bei der Endlagerüberwachung darauf beschränkt werden sollte, was wirklich zur Wissenserweiterung, für den Entscheidungsprozess oder den Langzeitsicherheitsnachweis notwendig ist [EC 2004].

8.5 Verfüll- und Verschlusskonzepte

Für jedes der in den betrachteten Ländern entwickelte Endlagerkonzept wurde auch ein Verfüll- und Verschlusskonzept entworfen und zum Teil erprobt. Die Auswahl der dafür vorgesehenen Barrieren und der zum Einsatz kommenden Materialien sind in starkem Maße vom ausgewählten oder verfügbaren Wirtsgestein abhängig.

Da Kristallingesteine eine hohe mechanische Festigkeit bieten, aber gleichzeitig häufig von wasserführenden Klüften durchzogen sind, müssen die technischen und geotechnischen Barrieren die Rückhaltefunktion der Radionuklide gewährleisten. Dementsprechend wurde ein korrosionsresistenter Endlagerbehälter mit Standzeiten >100.000 Jahren als Hauptbarriere entwickelt und erprobt. Zusätzlich soll Bentonit als quellfähiges und langzeitstabiles Abdichtmaterial für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen und -bauwerke eingesetzt werden.

Bei Endlagern in Tonstein wird dem Wirtsgestein aufgrund seines Isolationspotenzials die Hauptrückhaltefunktion der Radionuklide zugewiesen. Darüber hinaus sind Verfüll- und Verschlussmaßnahmen vorgesehen. Als bevorzugtes Material wird Bentonit, das quellfähig ist und bei Zutritt von Feuchtigkeit abdichten soll, verwendet.

Wie beim Endlager im Ton ist auch beim Endlager im Salz das Wirtsgestein die Hauptbarriere, die den langfristigen Einschluss der Radionuklide gewährleistet. Zusätzlich sind geotechnische Barrieren vorgesehen. Das Schließungskonzept für das Referenzendlagerkonzept in Salz in Deutschland sieht die vollständige Verfüllung des Grubengebäudes mit Salzgrus vor. Außerdem werden die Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen und die Schächte selbst durch Verschlussbauwerke abgedichtet. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde ein Sicherheits- und Nachweis-konzept für die Integrität der geotechnischen Barrieren entwickelt. Das Sicherheits-nachweis-konzept wurde entsprechend dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik und den neuen „Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ überarbeitet. Im Mittelpunkt des Nachweises steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere. Für die Verschlussbauwerke in Verbindungsstrecken und Schächten im Endlager wurden noch keine Referenzkonzepte festgelegt. Strecken- und Schachtverschlüsse werden Mehrkomponentenbauwerke mit Widerlagern und Dichtelementen sein. Zum Teil kann bei weiteren Planungen auf Erfahrung beim Bau von Verschlussbauwerken für stillgelegte Kali- und Salzbergwerke zurückgegriffen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Kenntnisstand bei der Planung und Umsetzung der wirtsgesteinsspezifischen Sicherheitskonzepte weit fortgeschritten ist. Dies schließt die Entwicklung von Endlagerbehältern, Verfüll- und Versatzmaterialien sowie von Verschlussbauwerken für Einlagerungsbohrlöcher und -strecken sowie Schächte und Rampen mit ein. Schwerpunkte der Forschung waren dabei die petrophysikalischen Eigenschaften des Verfüllmaterials und die Wechselwirkungen mit dem Endlagerbehälter und Wirtsgestein. Ein besonders umfangreicher Kenntnisstand liegt über die verschiedenen Bentonit-Typen vor, die als Verfüll- und Baumaterial für Verschlussbauwerke in den Wirtsgestein

steinen Ton und Granit vorgesehen sind. Die entsprechende Einbringtechnik wurde in Großversuchen erprobt. Zu den Verfüll- und Verschlussmaßnahmen und -bauwerken für Schächte und Rampen liegen bisher für alle Wirtsgesteine Konzepte vor. Entsprechende Erweiterungen der Forschungsprogramme im Hinblick auf Bau und Erprobung solcher Verschlüsse werden in der Zukunft durchzuführen sein.

8.6 Zusammenfassende Bewertung

Es besteht international Konsens hinsichtlich der Endlagerung von hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfällen in tiefen geologischen Formationen. Diese bieten das erforderliche langfristige Isolationspotenzial. International geltende Sicherheitsstandards und -prinzipien und nationale Regelwerke bilden den regulatorischen Rahmen für Planung, Bau, Betrieb und Verschluss von Endlagern. Die Suche nach und Auswahl von dafür geeigneten Standorten erfolgt nach länderspezifischen Gesichtspunkten. Dabei spielen sowohl die jeweils verfügbare Wirtsgesteinsformation als auch Art und Menge der Abfälle und politisch-gesellschaftliche Aspekte eine Rolle. Endgültige Standortentscheidungen sind z. B. in Finnland und Schweden bereits getroffen worden. Die technischen Endlagerkonzepte werden unter Berücksichtigung der lokalen Standortbedingungen sowie der Art und Menge der radioaktiven Abfälle entworfen. Die vorliegende Studie zeigt, dass für jede der in Betracht gezogenen Wirtsgesteine (Kristallin, Ton und Salz) passende Endlagerkonzepte entwickelt und beschrieben wurden. Die Eigenschaften des Wirtsgesteins prägen dabei dominant sowohl die Auslegung als auch die Methoden und Verfahren zur Herstellung des Endlagerbergwerks. Genauso bedeutsam sind die Wirtsgesteinseigenschaften hinsichtlich des erforderlichen Konzeptes an technische und geotechnische Barrieren. Während im Kristallingestein korrosionsresistente Behälter die Hauptfunktion zur Rückhaltung der Radionuklide gewährleisten müssen, übernehmen in Ton und Salz die Wirtsgesteine selbst diese Funktion. Aufgrund seiner Konvergenzeigenschaften, seiner relativ hohen Wärmeleitfähigkeit, und seiner im Vergleich zu Tonformationen in starken Mächtigkeiten vorkommenden Strukturen (z. B. Salzstöcke), bietet sich insbesondere für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle Salz als Endlagerwirtsgestein an. Darüber hinaus belegen mehr als 150 Jahre Erfahrung im Salzbergbau, dass Endlagerbergwerke in Salz sicher hergestellt und betrieben werden können.

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	KKW-betreibende und sonstige mit der Endlagerung befasste Länder [Kernenergie 2010]	21
Tabelle 3-1:	Geologische und geotechnische Anforderungen an ein Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle	27
Tabelle 3-2:	Günstige endlagerrelevante Eigenschaften von Steinsalz	28
Tabelle 3-3:	Günstige endlagerrelevante Eigenschaften von Tongesteinen	30
Tabelle 3-4:	Günstige endlagerrelevante Eigenschaften von kristallinen Gesteinen	33
Tabelle 4-1:	Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien für HAW-Endlagerstandorte	41
Tabelle 4-2:	Geowissenschaftliche Mindestanforderungen an HAW-Endlagerstandorte	42
Tabelle 4-3:	Spezielle Auswahlkriterien für Salzformationen, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen	43
Tabelle 4-4:	Spezielle Auswahlkriterien für Tongesteine, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen	44
Tabelle 4-5:	Spezielle Auswahlkriterien für Kristallingesteine, die bei der Standortvorauswahl berücksichtigt werden müssen	44
Tabelle 4-6:	Geowissenschaftliche Untersuchungen im Verlaufe früherer Phasen der Standortsuche (Standortvorauswahl)	47
Tabelle 4-7:	Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten in deutschen Salzstrukturen [Richter-Bernburg & Hofrichter 1964]	48
Tabelle 4-8:	Kriterien für die Auswahl eines Standortes für ein „Nukleares Entsorgungszentrum“ in Deutschland [KEWA 1974]	49
Tabelle 4-9:	Ausschlusskriterien, die im Standortauswahlverfahren des Landes Niedersachsen für ein „Nukleares Entsorgungszentrum“ angewendet wurden	51
Tabelle 4-10:	Methoden der übertägigen Standorterkundung	62
Tabelle 4-11:	Ziele geophysikalischer Untersuchungen im Rahmen von Standorterkundungsarbeiten	63
Tabelle 4-12:	Untersuchungsziele bei der übertägigen Erkundung von potenziellen Endlagerstandorten in Salinarstrukturen	65
Tabelle 4-13:	Untersuchungsziele der Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus Salinarformationen	66
Tabelle 4-14:	Untersuchungsziele bei der übertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten in Tonsteinformationen	67
Tabelle 4-15:	Untersuchungsziele der übertägigen Erkundungsarbeiten an potenziellen Endlagerstandorten in kristallinen Gesteinen	69

Tabelle 4-16:	Untersuchungsziele der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten	72
Tabelle 4-17:	Konzeptbezogene Untersuchungen	72
Tabelle 4-18:	Übersicht zu geomechanischen Untersuchungen im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung (In-situ-Messungen und Laboruntersuchungen)	74
Tabelle 4-19:	Übersicht zu Zielen und Methoden felsmechanischer In-situ-Versuche	75
Tabelle 4-20:	Untersuchungsziele hydrogeologischer In-situ-Untersuchungen	76
Tabelle 4-21:	Endlagerrelevante gekoppelte Prozesse, die im Verlaufe der untertägigen Standorterkundung untersucht werden	77
Tabelle 4-22:	Untersuchungsziele der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten im Steinsalz	79
Tabelle 4-23:	Erkundungsziele der untertägigen Standortuntersuchungen in Tongesteinen	81
Tabelle 4-24:	Untersuchungsziele bei der untertägigen Erkundung von Endlagerstandorten in kristallinen Gesteinen	82
Tabelle 5-1:	Mengengerüst der hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle in Deutschland [ISIBEL 2008]	107

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Schwankungen im Tongehalt (a) bzw. lithologische Inhomogenitäten (b) eines heterogen zusammengesetzten Teilabschnittes des Opalinustones der Schweiz, der generell als Beispiel für ein relativ homogenes toniges Wirtsgestein gilt [NAGRA 2002c]	31
Abbildung 3-2:	Variationsbreiten in der mineralogischen Zusammensetzung von weltweit vorkommenden tonigen Gesteinen [NAGRA 2002c]	31
Abbildung 3-3:	Variationen der Klufthäufigkeiten (links) und hydraulischen Durchlässigkeiten (rechts) in einer ca. 1000 m tiefen Erkundungsbohrung am potenziellen schwedischen Endlagerstandort Oskarshamn (Quelle SKB)	34
Abbildung 3-4:	Zusammenfassung der Eckpunkte der Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen [BGR 2006, aktualisiert]	36
Abbildung 4-1:	Verteilung der Naturparks, Kurzerholungs- und Feriengebiete im Bereich des Landkreises Lüchow-Dannenberg als Grund für die Nichtberücksichtigung des Standortes Gorleben im KEWA-Auswahlverfahren des Bundes [KEWA 1974]	50
Abbildung 4-2:	Verbreitung des Opalinustons und der Unteren Süßwassermolasse in der Schweiz [NAGRA 2002c]	54
Abbildung 4-3:	Verteilung der Salzlagerstätten in Europa [KBB 2007]. Deutlich zu sehen ist das Fehlen von Salzvorkommen in Skandinavien.	56
Abbildung 4-4:	Vorausgewählte Regionen für die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in Schweden	57
Abbildung 4-5:	Lage der fünf detailliert untersuchten Standorte für den Bau eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in Finnland	58
Abbildung 4-6:	Schematischer geologischer Schnitt und Lage des Endlagerstandortes Yucca Mountain mit den wichtigsten hydrogeologischen Einheiten (Quelle EPA)	60
Abbildung 4-7:	Beispiel für komplexe geophysikalische Untersuchungen in einer Erkundungsbohrung mit mächtigen Tonschichten, nahe Hannover-Wietze [Hoth et al. 2007]	68
Abbildung 4-8:	Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Blockverschiebungen am potenziellen HAW-Endlagerstandort Forsmark, Schweden [SKB 2005b]	71
Abbildung 4-9:	Beispiel für die Anwendung von EMR-Messungen im Wirtsgestein Salz zum Nachweis von lithologischen Grenzflächen und Grubenbauten (Quelle BGR)	79
Abbildung 4-10:	Beispiel für die Anwendung mikroakustischer Messungen zur Lokalisierung von Mikroriss-Bildungsprozessen im Umfeld einer Strecke im Wirtsgestein Salz (rote Punkte – registrierte akustische	

	Signale, schwarze Punkte – Position der Messeinrichtungen in den Bohrungen; Quelle BGR)	80
Abbildung 4-11:	Beispiel für die Anwendung geoelektrischer Messungen zur Analyse der EDZ (URL Mont Terri, Quelle BGR)	81
Abbildung 5-1:	Schweden – Varianten von kupferummantelten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente [SKB 2001]	86
Abbildung 5-2:	Schwedisches Endlagerkonzept KBS-3, mit Einlagerung von Endlagerbehältern in vertikale Bohrlöcher (Referenzkonzept: KBS-3V) und Einlagerung in horizontalen Strecken (alternativ: KBS-3H) [SKB 2001]	86
Abbildung 5-3:	Schweden – Prinzipskizze einer Maschine zur Einlagerung von Endlagerbehältern in vertikale Bohrlöcher (KBS-3V-Konzept) [SKB 2001]	87
Abbildung 5-4:	Schweden – Skizze einer mobilen Einlagerungsmaschine (Weiterentwicklung KBS-3V-Konzept [SKB 2007])	87
Abbildung 5-5:	Schweden – Alternative zum Referenzkonzept: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) [Pettersson 2006b].	88
Abbildung 5-6:	Schweden – Prinzipielle Darstellung des Gesamtendlagers mit übertägigen Anlagen und untertägigem Strecken- und Hohlraumssystem [Pettersson & Widing 2003]	89
Abbildung 5-7:	Finnland – Fotos von der Fertigung von Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente [Posiva]	90
Abbildung 5-8:	Finnland – Referenzendlagerkonzept KBS-3V (links) und die Variante (KBS-3H) zur Einlagerung von ausgedienten Brennelementen in horizontale Bohrlöcher [Posiva 2006]	91
Abbildung 5-9:	Finnland – Einlagerungsmaschine für BE-Behälter [STUK]	92
Abbildung 5-10:	Finnland – Prinzipielle Darstellung des gesamten Endlagers Olkiluoto mit den übertägigen Anlagen und dem Strecken- und Hohlraumssystem [Posiva 2006]	92
Abbildung 5-11:	Belgien – Prinzipielle Darstellung eines Supercontainers (Schnitt durch Behälter in einer Einlagerungsstrecke) [Bel et al. 2004]	94
Abbildung 5-12:	Belgisches Endlagerkonzept (Supercontainer); hier für ausgediente Brennelemente [Bel et al. 2004]	95
Abbildung 5-13:	Belgien – Prinzipskizze vom belgischen Endlager für wärmeentwickelnde und langlebige radioaktive Abfälle [ONDRAF/NIRAS 2001]	96
Abbildung 5-14:	Frankreich – Primärbehälter für verglaste HAW (175 l) (links – C0.2, C1 bis C4, rechts – C0.3) [Haverkate et al. 2006]	98

Abbildung 5-15: Frankreich – Typischer HAW-Endlagerbehälter mit keramischen Gleitern an der Behälteraußenwand [ANDRA 2005d]	98
Abbildung 5-16: Frankreich – Prinzipieller Aufbau eines Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente [ANDRA 2005d]	100
Abbildung 5-17: Schematische Darstellung einer Einlagerungszelle für die Endlagerung von verglasten HAW [ANDRA 2005d]	101
Abbildung 5-18: Schematische Darstellung einer Endlagerzelle für ausgedienten Kernbrennstoff [ANDRA 2005d]	101
Abbildung 5-19: Frankreich – Schematisches Layout des geplanten Endlagers [Haverkate et al. 2006]	103
Abbildung 5-20: Schweiz – Endlagerbehälter für HAW-Kokillen [NAGRA 2002b]	104
Abbildung 5-21: Prinzipskizze eines Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente [NAGRA 2002b]	104
Abbildung 5-22: Schweiz – Einlagerungsschema von BE/HAW in Einlagerungsstrecken (Abmessungen in m) [NAGRA 2002b]	105
Abbildung 5-23: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten und der Auslegung des Endlagers für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle in der Schweiz [NAGRA 2002a]	106
Abbildung 5-24: Skizzen von einer HAW-Kokille (links) und von einer CSD-C (rechts)	108
Abbildung 5-25: Zeichnung eines POLLUX-10-Behälters in Längsschnitt (oben) und im Querschnitt (unten)	109
Abbildung 5-26: Prinzipskizze einer Brennstabkokille (BSK)	110
Abbildung 5-27: Schematische Zeichnung zum deutschen Referenzendlagerkonzept im Salz	111
Abbildung 5-28: Fotos von Demonstrationsversuchen mit der Einlagerungstechnik für POLLUX-Behälter (links: Lokomotive zieht Plateauwagen unter Einlagerungsvorrichtung hervor; rechts: Einlagerungsvorrichtung legt den POLLUX-Behälter auf die Streckensohle)	112
Abbildung 5-29: Systemzeichnung der Einlagerungstechnik für die Bohrlochlagerung von HAW- und Brennstabkokillen	113
Abbildung 5-30: Versuchsanlage zur Demonstration der Einlagerung von BSK 3 bzw. HAW-Kokillen	114
Abbildung 6-1: Raise-Bohrkrone für die Erstellung des Personenschachtes für die Rock Characterization Facility ONKALO, Finnland [Posiva]	117
Abbildung 6-2: Rampe der Rock Characterization Facility ONKALO mit Anker- und Netzsicherung der Streckenwandung, Finnland [Posiva]	118
Abbildung 6-3: Erstellung von Sprengbohrlöchern in der Rock Characterization Facility ONKALO [Posiva]	120

Abbildung 6-4:	Erstellung von Einlagerungsbohrlöchern in ONKALO [Posiva]	121
Abbildung 6-5:	Auffahrung mit Teilschnittmaschine und parallelem Streckenausbau [Bastiaens et al. 2003].	123
Abbildung 6-6:	Betonausbau in Keilblocktechnik in der Verbindungsstrecke zwischen den Schächten des Untertagelabors HADES, Mol, Belgien [Bastiaens et al. 2003].	123
Abbildung 6-7:	Teilschnittmaschine, links verschiedene Schneidköpfe [NAGRA 2002a].	124
Abbildung 6-8:	Bohrwerkzeug für die Erstellung der horizontalen Einlagerungsbohrungen für wärmeentwickelnde Abfälle [ANDRA 2005d]	125
Abbildung 6-9:	Schematische Darstellung des Ausbaus der Gorleben-Schächte (unmaßstablich)	126
Abbildung 6-10:	Demonstrationsversuch für den Schachttransport eines Plateauwagens mit POLLUX-Behälter, Deutschland	130
Abbildung 6-11:	Einlagerungsmaschine für das KBS-3V-Konzept – Prinzipskizze einer Einlagerungsmaschine (links) und Prototyp (rechts)	131
Abbildung 6-12:	Von SKB (Schweden) neu entwickelte Einlagerungsmaschine auf Rädern für die vertikale Bohrlochlagerung	131
Abbildung 6-13:	BSK 3-Einlagerungsmaschine mit Plateauwagen, Transferbehälter und Grubenlok am Versuchsstand in Landesbergen bei Nienburg	132
Abbildung 6-14:	Einlagerungsmaschine mit Wasserkissentechnologie für die Einlagerung in horizontale Bohrlöcher (Untertagelabor Äspö, Schweden) [Pettersson 2006c]	133
Abbildung 6-15:	Versuchsanordnung zur Erprobung eines Schieberoboters für HAW-Kokillen im französischen Endlagerkonzept [ANDRA 2005d]	134
Abbildung 6-16:	Schemazeichnung eines Luftkissensystems zur Einlagerung von Endlagerbehältern in horizontale Bohrungen (Frankreich) [ANDRA 2005d]	134
Abbildung 6-17:	Demonstrationsversuche zur Zementverfüllung einer Einlagerungsstrecke: Behältermodell mit zentralem Erhitzer (links) und Einschalung (Mitte) sowie Schnitt durch das Modell mit vollständiger Verfüllung der Hohlräume (rechts), Belgien [Bel 2006].	135
Abbildung 6-18:	Demonstrationsversuch für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern in einem Endlager in Salz, Deutschland.	136
Abbildung 6-19:	Überblick über die Schutzziele und die damit verbundenen Überwachungsaufgaben [Biurrun et al. 2001].	138

11 Literaturverzeichnis

- [AkEnd 2002] Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd.– Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Berlin, 2002.
- [ANDRA 2001] Dossier 2001 Argile – Sur l’avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d’un stockage de déchets à haute activité et à la vie longue en formation profonde.–Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Rapport de synthèse – Partie A; Châtenay-Malabry, France.
- [ANDRA 2005a] Callovo-Oxfordien – Rapport de Synthèse.–Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne DRPADPE041110B, Châtenay-Malabry, France.
- [ANDRA 2005b] Dossier 2005 Granite. Synthesis – Assets of granite formations for deep geological disposal. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Châtenay-Malabry, France.
- [ANDRA 2005c] Dossier 2005 Granite. Tome: Architecture and management of a geological repository. Andra, December 2005.
- [ANDRA 2005d] Dossier 2005 Argile. Tome: Architecture and management of a geological repository. Andra, December 2005.
- [ANDRA 2006] Matières et Déchets Radioactifs – Loi de Programme du 28 Juin 2006. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Collection Les Références, Châtenay-Malabry, France.
- [Autio & Kirkkomäki 1996] Autio, J. & Kirkkomäki, T.: Boring of full scale deposition holes using a novel blind boring method. (POSIVA 96-07), Posiva Oy, 1996.
- [Bäckblom & Almén 2004] Bäckblom, G., Almén, K.-E.: Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel. Rapport R-04-13. SKB, Stockholm, 2004.
- [Bastiaens et al. 2003] Bastiaens, W. et al.: EURIDICE. The connecting gallery. EURIDICE Report 03-294, December 2003.

- [BGR 2004] Bräuer, V. et al. : Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands; Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin und Hannover, November 2004.
- [Bel et al. 2004] Bel, J., de Brock, C., Giovannini, A., Von Cotthem, A., Detilleux, M.: „Alternative deep repository design for disposal of very high level waste in Belgium“, WM'04 Conferences, Tucson, February 29 – March 4, 2004.
- [Bel 2006] Bel, J.: Engineered Barrier – Buffer Construction Technologies. ESDRED-Workshop “Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste”, University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [BGR 2006, aktualisiert] Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. BGR-Bericht, Hannover, 2006.
- [BFE 2008] Sachplan Geologisches Tiefenlager - Konzeptteil.-- Bundesamt für Energie (BFE): 92 S.; Bern/Schweiz.
- [BfS 2002] Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000. – BGR, unveröffentl. Ber.: Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2002.
- [Biurrun et al. 2001] E. Biurrun, E., Bundrock, G., Engelhard, J., Horlbeck, B., Jobmann, M., Teichmann, L., Walther, C., Weidenbach, J.: Repository monitoring in Germany, Internal Report, 107 pages, editor: M. Jobmann, DBE, Peine, Germany, 2001.
- [BMU 2003] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektgruppe Nationaler Entsorgungsplan; RS III 2-13200/1, Arbeitsgruppe Nationaler Entsorgungsplan für Reststoffe, November 2003.
- [BMU 2009] Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle – Entwurf, Bonn, 2009.

- [Bodenez et al. 2008] Bodenez, P., Rieu, J., Niel J.C.: Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de sûreté nucléaire. Version du 12/02/2008.
- [Bollingerfehr et al. 2008] Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M. & Wehrmann, J.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). AP 1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. FKZ 02 E 10065, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-20-2008-AP, Peine 2008.
- [Bornemann et al. 2008] Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil III. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE UND DEM LANDESAMT FÜR BERGBAU, Energie U. Geologie.--, Geol. Jb., C 73, Stuttgart (Schweizerbart) - ISBN 978-3-510-95963-1.
- [Bosgiraud 2006] Bosgiraud, J.M.: Pushing Robot (French Concept). ESDRED-Workshop "Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste", University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [Bossart & Thury 2008] Bossart, P. & THURY, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Bossart, P., THURY, M.– Swiss Geological Survey (SGS), 3, Wabern/Schweiz - 978-3-302-40016-7.
- [Bräuer et al. 1994] Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P. & Sprado, K. H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. – BGR-Bericht, Hannover.
- [Bräuer et al. 2004] Bräuer et al.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands; Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen, BGR, Hannover und Berlin, November 2004.
- [Bräuer et al., in Vorb.] Bräuer et al. (in Vorb.): Projekt Gorleben - Standortbeschreibung Gorleben – Teil IV - Geotechnische Erkundung – Abschlussbericht. Unveröff. Bericht, BGR; Hannover.

- [CNE 1995] Rapport d'évaluation No. 1. Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), Paris, France, 1995.
- [CROP] CROP, „Swiss Country Annex for WP1 Design and construction of engineered barriers“.
- [DBE 1994] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransportes, Abschlussbericht, Hauptband, Peine, März 1994.
- [DBE 1995] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, Peine, September 1995.
- [Dierick et al. 1998] Dierick, C., Detilleux, M., Nuyt, G., Janssen, L., Demazy, G.: „Synthesis of the technical feasibility evaluation of spent fuel conditioning in Belgium“, Proceedings WM'98, Tucson, März 1998.
- [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, 2004.
- [EIA Act 486/1994] EIA Act on Environmental Impact Assessment Procedure (468/1994), Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (No. 468/1994)
- [EIA Act 713/2006] EIA Act and Decree (713/2006) implemented in Finland on the basis of the Directive on Environmental Impact Assessment (EIA,85/337/EEC) issued by the Council of the European Community (EC).
- [EKRA 2000] Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA): Schlussbericht, Bern, Januar 2000.
- [Filbert & Engelmann 1998] Filbert, W. & Engelmann, H. J.: Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“, Abschlussbericht; DBE 1998.
- [Filbert et al. 2004] Filbert, W. et al.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tonstein (GEIST), Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2004.

- [Filbert et al. 2008] Filbert, W., Bollingerfehr, W. & Wehrmann, J.: Optimization of emplacement technology for spent fuel. EAFORM, Tokio, 20.-23.November 2008
- [Filbert et al. 2010] Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M., Wehrmann, J., „Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Juni 2010.
- [Fopp et al. 2008] Fopp, S., Graf, R. & Filbert, W.: Disposal of spent fuel in salt using borehole technology: BSK3 concept. Int.Youth Nucl.Congr., Interlaken 2008.
- [Gesetz 1991] Gesetz über die Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle No. 91-1381 vom 30. Dezember 1991 (entspricht § 542-1 Umweltgesetzbuch).
- [Gesetz 2006] Planungsgesetz über die nachhaltige Entsorgung radioaktiver Materialien und Abfälle No. 2006-739 vom 28. Juni 2006.
- [GmuG 2005] Manthei, G., Philipp, J.: Spannungsänderung im Gestein mit Schallemissionsmessungen, Ober-Mörlen, 2005 - www.gmug.com/download/gmug_hydrofrac_01.pdf
- [GNB 1998] Gesellschaft für Nuklear-Behälter: Beschreibung der Brennstabkille BSK 3, GNB B 043/98, September 1998.
- [Grupa et al. 2000] Grupa, J. B. et al.: „Concerted action on retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final Report“, EC nuclear science and technology, EUR 19145; 2000.
- [Gunnarsson et al 2007] Gunnarsson, D., Morén, L., Sellin, P. & Keto, P. : Deep Repository – Engineered Barrier Systems, Assessments of Backfill Materials and Methods for Deposition Tunnels, Working Report 2006-64, Posiva, Olkiluoto 2007.
- [Hammer & Sönke 2009] Hammer, J. & Sönke, J. (2009): Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Eugenia Abschlussbericht – Teil 2. unveröff. Bericht, BGR, Hannover, 2009.

- [Hammer et al. 2009] Hammer, J., Sönke, J. & Mingerzahn, G.: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Abschlussbericht, EUGENIA, Unveröff. Bericht, BGR, Hannover, 2009.
- [Haverkate et al. 2006] B.R.W. Haverkate, J. Hart, A.D. Poley, Review of the Horizontal Emplacement Technique concerning Retrieval Disposal Cell Concept, Petten, 20 January 2006.
- [Hoth et al. 2007] Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H.: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. BGR, Berlin/ Hannover, 2007.
- [HSK 2007] HSK (2007): Sachplan geologische Tiefenlager. Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation. Schweizerische Eidgenossenschaft. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK, HSK 33/001, Villingen, Schweiz, Juni 2007.
- [Hund et al. 1991] Hund, W., Stier-Friedland, G., Greve, D. & Jaritz, W. (1991): Geowissenschaftliche Untersuchungen bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben von unter Tage. Interner Bericht ET-IB-48-REV-1, Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter, 1991.
- [IAEA 1993] International Atomic Energy Agency: Report on Radioactive Waste Disposal, IAEA Technical Reports Series No. 349; Vienna, 1993.
- [IAEA 1994] International Atomic Energy Agency: Siting of Geological Disposal Facilities - A Safety Guide, IAEA Safety Series No. 111-G-4.1, Vienna, 1994.
- [IAEA 1999] International Atomic Energy Agency: Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste.- Technical Reports Series No. 391, Vienna, 1999.
- [IAEA 2001] Monitoring of geological repositories for high-level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208, Vienna, 2001.
- [IAEA 2003] International Atomic Energy Agency: Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes. IAEA Technical Reports Series No. 413; Vienna, 2003.

- [Ikonen 2003] Ikonen, K.: Themal analysis of spent nuclear fuel repository, Posiva Report, POSIVA 2003 – 04, Posiva Oy, Olkiluoto, Finnland, 2003.
- [ISIBEL 2008] Abschlussbericht für das Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“ ISIBEL, AP 1.2: Konzeptionelle Endlagerplanung, Aufgabe 1: Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
- [Jaritz 1979] Jaritz, W.: Einige Fragen sind erst nach den Bohrungen zu beantworten. Umschau 796, S. 179-182, 1979.
- [Jaritz 1981] Jaritz, W.: Vorkenntnisse über den Salzstock Gorleben und Gründe für die Annahme als Untersuchungsobjekt für den Bund. In: Entsorgung. Bericht Info-Veranstaltung „Energiedialog Bundesregierung. Zwischenbericht zum Salzstock Gorleben“, Bonn 11-19, 1981.
- [Jaritz 1983] Jaritz, W.: Das Konzept der Erkundung des Salzstocks Gorleben von übertage und die Festlegung von Schachtstandorten. N. Jb. Geol. Paläont. Abh., Enke-Verlag, Stuttgart, 1983.
- [Jobmann et al. 2007] Jobmann, M., Amelung, P., Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H., Uhlig, L.: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein, F+E-Vorhaben GENESIS, Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY, Peine, 2007.
- [Jockwer 1981] JOCKWER, N.: Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. – GSF, Inst. F. Tief Lagerung, Wiss. Abt., GSF-Bericht T119, Braunschweig, 1981.
- [Kaiser et al. 2007] Kaiser, D., Spies, T. & Schmitz, H.: ERA Morsleben: Durchführung mikroakustischer Messungen zur Erkundung des Gebirgszustandes. Zwischenbericht, BGR, Hannover, 2007.
- [KBB 1974] KBB (1974): Geologisch-topographische Vorstudie zur Standortvorauswahl für ein Speicherprojekt der KEWA - Zusammenstellung und Bewertung geologischer und topographischer Daten von Salzstöcken in Norddeutschland für den Bau von Kavernen, Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft mbH, Hannover, Oktober 1974.

- [KBB 2007] KBB Underground Technologies: Compilation of geological and geotechnical data of worldwide domal salt deposits and domal salt cavern fields. Hannover, 2007.
- [KEG 2003] KEG (2003): Kernenergiegesetz vom 21.03.2003. KEG (Stand am 1. Januar 2009), Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- [Keller 2009] Keller, S.: Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hoch-radioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Unveröff. Ber., BGR, Hannover, 2009.
- [Kernenergie 2010] www.kernenergie.de
- [KEV 2004] KEV (2004): Kernenergieverordnung vom 10.12.2004. KEV (Stand am 1. Januar 2009), Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz, 2004.
- [KEWA 1974] KEWA GmbH (1974): Ermittlung mehrerer alternativer Standorte in der Bundesrepublik Deutschland für eine industrielle Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungsanlage (vom BMFT gefördert), Frankfurt/M.-Höchst, KEWA-Zwischenbericht über den Berichtszeitraum vom 1.1. – 31.12.1976.
- [Klinge et al. 2007] Klinge, H., Böhme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R. R., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Standortbeschreibung Gorleben Teil I. Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Landesamt für Bergbau, E. u. G.--, Geol. Jb., C 71, Stuttgart (Schweizerbart), 2007 - ISBN 978-3-510-95963-1.
- [Köthe et al. 2007] Köthe, A., Zirngast, M., Zwirner, R.: Standortbeschreibung Gorleben Teil II. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Dem Landesamt für Bergbau, E. U. G.--, Geol. Jb., C 72, Stuttgart (Schweizerbart), 2007 - ISBN 978-3-510-95963-1.
- [Langguth & Voigt 2004] Langguth, H.-R. & Voigt, R.: Hydrogeologische Methoden – 2., überarb. u. erw. Aufl., Springer, Berlin 2004, ISBN 3-540-21126-8.

- [Liedtke et al 1994] Liedtke, L., Götschenberg, A., Jobmann, M., Siemering W.: Felslabor Grimsel – Bohrlochkranzversuch - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in geklüftetem Fels, NTB 94-02: 170 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1994.
- [Londe 2006] Londe, L.: Example of a Prefabricated External Buffer System (French System) V2. ESDRED-Workshop "Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste", University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [Lüttig & Wagner 1974] Lüttig, G. & Wager, R.: Feasibility-Studie über präsumtive Standorte einer Wiederaufbereitungsanlage für Kernbrennstoffe. unveröff. Studie, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung NLFb, Hannover, 1974.
- [Macfarlane & Ewing 2006] Macfarlane, A. M. & Ewing, R. C. (eds.): Uncertainty Underground - Yucca Mountain and the Nation's High-Level Nuclear Waste.-- MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 2006: 431; London
- [Mayer 2008] Mayer, S.: Andra's monitoring developments programme: National context, potenzial monitoring objectives and first thoughts on monitoring strategies. Contribution to the *MoDeRn* workshop discussions. ANDRA, 26/02/2008.
- [Mazurek et al. 2003] Mazurek, M., Pearson, F.J., Volckaert, G. & Bock, H.: Features, Events and Processes evaluation catalogue for argillaceous media. Nuclear Energy Agency Report NEA 4437. OECD/NEA, Issyles-Moulineaux, France, 2003.
- [McKinley & Russel 2002] McKinley, I.G., Russel, Alexander W.: Integration of TRU disposal studies in Switzerland, Proceedings WM'02 Conference, Tuscon, February 24-28, 2002.
- [NAGRAa] Abfallinventare und Mengen
<http://www.nagra.ch>
- [NAGRAb] Lager HAA
<http://www.nagra.ch>
- [NAGRA 1985] NAGRA: Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985 NAGRA. NAGRA Projektbericht NGB 85-01/09; Wettingen/Schweiz, 1985.

- [NAGRA 1991] NAGRA: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1990: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen NAGRA Technischer Bericht NTB 91-19; Wettingen/Schweiz, 1991.
- [NAGRA 1994a] NAGRA: Kristallin-I. Safety Assessment Report. NAGRA. NAGRA Technischer Bericht NTB 93-22; Wettingen/Schweiz, 1994.
- [NAGRA 1994b] NAGRA: Sedimentstudie - Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990-1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. NAGRA. NAGRA Technischer Bericht NTB 94-10; Wettingen/Schweiz, 1994.
- [NAGRA 1999] NAGRA: «Coupled transport phenomena in the Opalinus clay: Implications for radionuclide transport NTB 99-09: 60 S. NAGRA (2001): Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The NAGRA-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock NAGRA Technischer Bericht NTB 00-09; Wettingen/Schweiz, 1999.
- [NAGRA 2001] NAGRA: Grimsel Test Site – Investigation Phase IV (1994-1996): The NAGRA-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock NAGRA Technischer Bericht NTB 00-09; Wettingen/Schweiz, 2001.
- [NAGRA 2002a] Technischer Bericht 02-02, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers (Entsorgungsnachweis), Nagra Wettingen, Schweiz, Dezember 2002
- [NAGRA 2002b] NAGRA: Project Opalinus Clay - Safety Report. "Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis)". NAGRA, NTB 02-05, Wettingen/Schweiz, 2002.
- [NAGRA 2002c] Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra, NTB 02-03: 659 S.; Wettingen/Schweiz, 2002.
- [NAGRA 2004] NAGRA: Nuclide Transport and Diffusion for Vein and Fracture Flow. NTB 04-03, Wettingen/Schweiz, 2004.

- [NAGRA 2005] NAGRA (2005): Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle. Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtsgesteine und Gebiete. NAGRA, NTB 05-02: 94 S.; Wettingen/Schweiz, 2005.
- [NAGRA 2008a] NAGRA: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). NAGRA Technischer Bericht NTB 08-03. NAGRA, Wettingen, Schweiz, 2008.
- [NAGRA 2008b] NAGRA: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. NAGRA Technischer Bericht NTB 08-04. NAGRA, Wettingen, Schweiz, 2008.
- [NAGRA 2008c] NAGRA: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. NAGRA Technischer Bericht 08-05. NAGRA, Wettingen, Schweiz, 2008.
- [Nold 2006] Nold, A.L.: Example of a buffer system consisting of compacted blocks and granular bentonite pellets (Swiss concept). ES-DRED-Workshop "Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste", University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [Nowak & Weber 2002] Nowak, T. & Weber, J.: Projekt Gorleben – Hydraulische Charakterisierung der Salzbarriere Gorleben. Abschlussbericht zum AP 9G4151110000, BGR, unveröffentl. Ber., Archiv-Nr. 0123070, Hannover, 2002.
- [ONDRAF/NIRAS 2001] ONDRAF/NIRAS "Technical overview of the SAFIR 2 report", NIROND 2001-05 E, December 2001
- [Pahl et al. 1989] Pahl A., Heusermann St., Bräuer V. & Glögger W. (1997): Grimsel Test Site: Rock stress investigations. Hannover, Germany: BGR - NAGRA Rep. NTB 88–39E, 1989.

- [Pettersson 2006a] Pettersson, S.: Spent Nuclear Fuel Management Strategies in Sweden and the deep repository for spent fuel. ESDRED-Workshop "Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste", University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [Pettersson 2006b] Pettersson, S.: Example of an Integrated Prefabricated System – The Swedish Super Container for KBS-3H concept. ESDRED-Workshop "Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste", University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [Pettersson 2006c] Pettersson, S.: Air / Water Cushion Technology. ESDRED-Workshop "Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive waste", University Politehnica of Bucharest, 8-9 November 2006.
- [Pettersson & Widing 2003] Pettersson, S. & Widing, E.: Development of the Swedish deep repository for spent nuclear fuel in crystalline host rock. WM'03 Conference, Tucson, February 23-27, 2003.
- [Pierce & Rich 1962] Pierce, W.G. & Rich, E.I.: Summary of rock salt deposits in the United States as possible storage sites for radioactive waste materials. US Geol. Survey, Bull. 1148, 1962.
- [Pöhler 2008] Pöhler, M.: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein. ERATO. Abschlussbericht. FKZ 02 E 10286, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-28-2008-AB, Peine 2008.
- [Polster 2004] Poster, M.: GEIST – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein, Teilbericht: Thermische Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung von Brennstabkernen (BSK) im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2004.
- [Posiva] <http://www.posiva.fi>
- [Posiva 2003] Posiva: Programme of Monitoring at Olkiluoto during construction and operation of the ONKALO, Posiva Oy, December 2003.
- [Posiva 2005] Posiva: Olkiluoto Site Description 2004 – volume 1. Report Posiva Oy, Olkiluoto, 2005, ISBN 951-652-135-5.

- [Posiva 2006] Pastina, B. & Hellä, P.: Expected evolution of a spent fuel repository in Olkiluoto, Posiva 2006-05, December 2006, revised December 2007
- [Posiva 2007] Saanio, T., Kikkomäki, T., Keto, P., Kukkola, T. & Raiko, H.: Preliminary Design of the Repository. Stage 2. Working Report 2006-94, Posiva, Olkiluoto 2007
- [Rempe 2008] Rempe, N. T. (2008): Eight years WIPP progress. Proceed. RepoSafe 2007, Braunschweig, GRS & BfS 81-87, 2008.
- [Richter-Bernburg & Hofrichter 1964] Richter-Bernburg, G. & Hofrichter, E.: Projekte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in ausgesolten Kavernen. unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover (März 1964), Archiv-Nr. 0023216.
- [Schramm et al. 2009] Schramm, M., Kühnlentz, T., Mingerzahn, G. & Hammer, J.: Projekt Gorleben: Lösungen im Salzstock Gorleben – eine Dokumentation und genetische Interpretation. Abschlußbericht, unveröffentl. Ber. BGR, Hannover, 2009.
- [Schreiner & Kreysing 1998] Schreiner, M. & Kreysing, K.: Geotechnik Hydrogeologie.- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- [SKB 1999] Deep repository for spent nuclear fuel. SR-97-Post closure safety. Main report volume I and Volume II. SKB TR-99-06, November 1999.
- [SKB 2001] Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB, Technical Report, TR-01-03, December 2000.
- [SKB 2005a] SKB: Site investigation Oskarshamn – annual report 2005. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2005.
- [SKB 2005b] SKB: Site investigation Forsmark – annual report 2005. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2005.
- [SKB 2006] SKB: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB Technical report TR-01-30. SKB, October 2006.
- [SKB 2007] SKB: Site investigation Forsmark – annual Report 2006. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2007.

- [SKB 2008] SKB: Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase - SDM-Site Forsmark. Technical Report TR-08-05: 545 P.; Svensk Kärnbränslehantering AB, 2008.
- [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), 2004.
- [Steinberg 1993] Steinberg, S.: Weiterentwicklung und Erprobung der Trockenbohrtechnik zur Herstellung tiefer Bohrlöcher für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle; Bericht über den Zeitraum 01.10.1990 - 31.12.1992. FKZ: BMFT 02E8070, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Inst. für Tief Lagerung, GSF-TL--37/93, Braunschweig, 1993.
- [Stier-Friedland et al. 1997] Stier-Friedland, G., Ranft, M. & Bornemann, O: Geowissenschaftliche Untersuchungen bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben von unter Tage - Erkundungssohle. Interner Bericht ET-IB-96, Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter, 1997.
- [STUK] <http://www.stuk.fi>
- [Theis 1956] Theis, C.W.: Problems of ground disposal of nuclear wastes. In: United Nations (ed.): Proceedings of the Internat. Confer. on the peaceful uses of atomic energy, vol. 9: Reactor technology and chemical processing, New York, 1956, 679-683.
- [TVO 1985] TVO 1985 – safety assessment
- [Vieno & Nordman 1999] Vieno, T. & Nordman, H.: Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara: TILA-99. Posiva Report 99-07. Posiva Oy, Helsinki, Finland, 1999.
- [Wieczorek & Rothfuchs 2006] Wieczorek, K., Rothfuchs, T.: Einsatz und Weiterentwicklung geophysikalischer Mess- und Überwachungsmethoden in Untertagelabors für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. K. Wieczorek und T. Rothfuchs. Messen in der Geotechnik 2006.
- [Wieczorek et al. 2007] Wieczorek, K., Zhang, Ch.-L., Jockwer, N & Rothfuchs, T.: Investigation of the hydraulic-mechanical behaviour and the gas migration issue in the Opalinus Clay at the Mont Terri URL. Proceedings, RepoSafe, Braunschweig, 2007.
- [Zirngast 1985] Zirngast, M. (1985): Dynamik des Salzstocks Gorleben. BGR, unveröffentl. Ber., BGR, Archiv-Nr. 97673, Hannover, 1985.

12 Liste der Anhänge

- Anhang 1: AP1 und 2 Bericht – Zusammenstellung internationaler Konzepte zur Einlagerung in tiefen Gesteinsformationen und zugehörigen Sicherheitskonzepte, DBE TECHNOLOGY GmbH, September 2008, Peine
- Anhang 2: AP3 Bericht – EUGENIA Teil 1: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen, BGR, Mai 2009, Hannover
- Anhang 3: AP4 Bericht – EUGENIA Teil 2: Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen, BGR, Juli 2009, Hannover
- Anhang 4: AP5 Bericht – Technische Endlagerkonzepte, DBE TECHNOLOGY GmbH, September 2009, Peine
- Anhang 5: AP6 Bericht – Bau und Betrieb von Endlagerbergwerken, DBE TECHNOLOGY GmbH, Juni 2009, Peine
- Anhang 6: AP7 Bericht – Verfüll- und Verschlusskonzepte, DBE TECHNOLOGY GmbH, Dezember 2008, Peine
- Anhang 7: AP8 Bericht – Geotechnische Überwachungsmethoden beim Endlagerbetrieb, DBE TECHNOLOGY GmbH, Juni 2009, Peine
- Anhang 8: AP9 Bericht – Genehmigungstechnische Aspekte, DBE TECHNOLOGY GmbH, Januar 2009, Peine