

***Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten
in Salz und Tongestein (FKZ 02 E 9511)
GEIST***

***Vergleich der technischen Endlagerkonzepte
im Wirtsgestein Salz und Ton (A2)***

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 2004

Projektleiter: W. Filbert
DBE TECHNOLOGY GmbH

Zusammengestellt von: W. Filbert

Bearbeiter: P. Amelung
W. Bollingerfehr
W. Filbert
N. Müller-Hoeppe
M. Polster
J. Ziegenhagen
DBE TECHNOLOGY GmbH

J. Behrens
J. Kutowski
T. Schwarz
Deutsche Gesellschaft zum
Bau und Betrieb von Endlagern
für Abfallstoffe mbH (DBE)

DBE TECHNOLOGY GmbH

Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums Wirtschaft und Arbeit (BMWA), vertreten durch den Projektträger für Wassertechnologie und Entsorgung im Forschungszentrum Karlsruhe, durchgeführt (FKZ 02 E 9511). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Dieser Bericht unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts und darf nur mit Zustimmung der DBE TECHNOLOGY GmbH oder ihrer Auftraggeber ganz oder in Teilen vervielfältigt werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST)“ wurden die charakteristischen Unterschiede zwischen einem generischen Endlager für hochaktive Abfälle im Salz und einem in Tongestein herausgearbeitet. Insbesondere wurden die Besonderheiten eines Endlagers im Wirtsgestein Ton hinsichtlich der Technik, der Sicherheit und der Kosten analysiert und offene Fragen identifiziert. Die Gegenüberstellung konzentrierte sich auf den Bereich des Endlagers. Im vorliegenden Anlagenband A2 erfolgt ein Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton sowie eine Darstellung der Vor- und Nachteile der Wirtsgesteine. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt in fünf Bereichen:

Bergbau in den Wirtsgesteinen Salz und Ton

Der Bergbau im Wirtsgestein Salz ist aufgrund der Standfestigkeit des Gebirges und der einfachen Herstellbarkeit von Strecken und Kammern und Bohrungen gut beherrschbar. Je nach Kriechrate werden in größeren zeitlichen Abständen Nachschneidemaßnahmen an den Strecken und Kammern durchgeführt, um die erforderlichen Lichtraumprofile einzuhalten. Bohrlöcher zur Wetterführung oder zur Einlagerung von Endlagergebinden lassen sich im Trockenbohrverfahren einfach herstellen. So können Salzbergwerke über viele Jahrzehnte sicher ohne stützenden Ausbau betrieben werden.

Bergbau auf Ton in einer für ein Endlager relevanten Teufe existiert in Deutschland nicht, da abbauwürdige Tonformationen an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden. Eine Untersuchung oberflächennaher Bergwerke bis zu einer Teufe von 80 m zeigte, dass dort ein hoher Aufwand für Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen für die Grubenräume erforderlich ist. In der Schachtanlage Konrad im niedersächsischen Salzgitter sind demgegenüber aber Strecken im Ton in größeren Teufen bergmännisch aufgefahren worden. Es zeigte sich, dass der Ton dort gegen die Feuchtigkeit der Wetter geschützt werden muss. Hierzu reichen ca. 7 cm Spritzbeton mit leichten Matten zur Stabilisierung aus. Bei ungünstigen geologischen Spannungszuständen kann ein stärkerer, z.B. stahlmattenarmerter, doppelschaliger, Ausbau erforderlich sein. Die durchzuführenden Stabilisierungsmaßnahmen sind formations- und teufenabhängig. Das Bohren in Ton ist mit über Tage eingesetzter Technik nach entsprechenden Anpassungen auch unter Tage möglich. Für die Einlagerung von Endlagergebinden in Bohrlöchern ist im Gegensatz zum Wirtsgestein Salz eine Bohrlochverrohrung erforderlich.

Endlagerbehälterkonzepte

Die Anforderungen an die Endlagergebinde leiten sich für die Wirtsgesteinsformationen Salz und Ton aus unterschiedlichen Sicherheitsnachweiskonzepten ab. Im Wirtsgestein

stein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschlusses durch das Salzgestein. Konzeptführend ist hier die Barrierefunktion der (natürlichen) geologischen Barriere und des Schachtverschlusses. Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen und geotechnischen Barrieren konzeptführend.

Deshalb muss im Wirtsgestein Ton der Endlagerbehälter für einen sehr langen Zeitraum intakt bleiben, d. h. der Behälter muss für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmedium sowie dem Gebirgsdruck standhalten. Als zusätzlicher Effekt ist die mögliche Korrosion der Behälter durch auf der Oberfläche abgelagertes Salz aus dem Siedeeffekt von über 100 °C aufgeheizten Formationswässern zu nennen. Darüber hinaus muss aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des Bentonits, dessen Quelfähigkeit bei Temperaturen > 100 °C stark eingeschränkt wird, im Wirtsgestein Ton in der Regel die Belademenge der Endlagergebäude verringert werden.

Hinsichtlich Materialauswahl und Konstruktion der Endlagerbehälter im Wirtsgestein Ton ergeben sich daraus folgende Aussagen:

- Auf Grund der Temperaturbegrenzung (100 °C) kann nur eine gegenüber der Endlagerung in Salz vergleichsweise geringe Beladung des POLLUX-Behälters bzw. der Brennstabkokille mit gezogenen Brennstäben erfolgen.
- Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz korrosionsfester Stähle oder durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierter Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung auf die Endlagersicherheit auswirken kann.
- Bei Einsatz von Brennstabkokillen für die Endlagerung gezogener Brennstäbe ist zu prüfen, ob diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden müssen, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

Einlagerungskonzepte und daraus resultierende erforderliche Endlagerflächen

Für einen Vergleich der Endlagerkonzepte können keine realen geologischen Verhältnisse zugrunde gelegt werden, weil keine Standorte benannt und hinreichend erkundet sind. Deshalb werden theoretische Mindestflächen für die Einlagerung der Endlagergebäude anhand von sogenannten Einheitszellen ermittelt und für die beiden Wirtsgesteinsformationen vergleichend gegenübergestellt. Einheitszellen stellen den theoretisch für ein spezifisches Endlagergebäude aufgrund seiner Wärmemenge erforderlichen Endlagerflächenbedarf dar.

Im Wirtsgestein Salz wird unter Zugrundelegung des Mengengerüstes von 1 657 POLLUX-10 umgerechnet in POLLUX-8 (Zwischenlagerzeit 30 Jahre, Einheitszelle mit 237 m²) für die Streckenlagerung eine Netto-Endlagerfläche von ca. 0,5 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommt für die Bohrlochlagerung von 4778 HAW-Kokillen (Zwischenlagerzeit 15 Jahre, Einheitszelle mit 2 217 m²) eine Netto Endlagerfläche von ca. 0,051 Mio. m². Damit beträgt der Gesamtnetto- Endlagerflächenbedarf für ein solches Endlager in Salz ca. 0,55 Mio. m².

Im Wirtsgestein Ton wird nach der entsprechenden Umrechnung von 1 657 POLLUX-10 in 5 524 POLLUX-3 Gebinde (Zwischenlagerzeit 31 Jahre, Einheitszelle mit 764 m²) eine Netto-Endlagerfläche von ca. 4,22 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von 4 778 HAW-Kokillen (Zwischenlagerzeit 40 Jahre, Einheitszelle mit 780 m²) eine Netto-Endlagerfläche von 0,533 Mio. m². Beim Vergleich mit dem Flächenbedarf im Wirtsgestein Salz sind insbesondere hier die unterschiedlichen Zwischenlagerzeiten zu berücksichtigen. Damit beträgt der Gesamtnetto-Endlagerflächenbedarf für ein solches Endlagerkonzept in Ton ca. 4,75 Mio. m².

Als Alternative zur Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern in Ton wurde die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen untersucht und mit dem Einlagerungskonzept der BSK 3 für Salz verglichen. Im Wirtsgestein Salz wird unter Zugrundelegung des Mengengerüstes ca. 5 524 BSK 3 (Zwischenlagerzeit 10 Jahre, Einheitszelle mit 2 235 m²) eine Netto-Endlagerfläche von 0,23 Mio. m² erforderlich. Im Wirtsgestein Ton wird nach der entsprechenden Umrechnung auf 8 286 BSK 2 (Zwischenlagerzeit 32 Jahre, Einheitszelle mit 2 165 m²) eine Netto Endlagerfläche von 4,49 Mio. m² erforderlich. Ein direkter Vergleich mit dem Konzept im Wirtsgestein Salz ist nicht möglich, da im Ton erst nach einer Zwischenlagerzeit von 40 Jahren gegenüber 10 Jahren im Salzkonzzept die Brennstabkokillen vom Endlager angenommen werden können.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse zum Vergleich der erforderlichen Endlagerflächen in Salz und Ton zusammen. Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur von 100 °C und den geringeren möglichen Bohrlochtiefen ist ein deutlich höherer Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton erforderlich.

Endlagerkonzept	Streckenlagerung		Bohrlochlagerung		
	POLLUX-8	POLLUX-3	HAW-Kokillen	BSK 3	BSK 2
Im Wirtsgestein Salz [Mio. m ²] (Zwischenlagerzeit [a])	0,5/(30)	-	0,051/(15)	0,23/(10)	-
Im Wirtsgestein Ton [Mio. m ²] (Zwischenlagerzeit [a])	-	4,22/(31)	0,533/(40)	-	4,49/(32)

Vergleich der erforderlichen Endlagerflächen in Salz und Ton

Verfüll- und Verschlusskonzept

Ein Vergleich der Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager in Salz und Ton zeigt, dass die wesentlichen Unterschiede in dem Material bestehen, das zur Verfüllung der Strecken und Kammern genommen wird. Während beim Endlager in Salz das bei der Auffahrung der Strecken anfallende Salzgrus genommen wird, müssen beim Endlager in Ton die Verfüllmaterialien Bentonit und Bentonit/Sand-Gemische separat hergestellt und ins Endlager transportiert werden. Die Einbringtechnologie in Strecken und Kammern dafür unterscheidet sich ebenfalls wesentlich. Salzgrus wird mit entsprechender Fördertechnik (Blas- oder Schleuderversatz) ohne zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen eingebracht. Bentonit und Bentonit/Sand - Gemische müssen mit vorgegebener Einbaudichte qualitätsgesichert in die Strecken und Kammern respektive Bohrlöchern eingebaut werden.

Hinsichtlich der Schachtverfüllung und -verschlüsse sind die Unterschiede deutlich geringer. In beiden Fällen werden setzungsarme Verfüllsäulen aus Hartgesteinsschotter eingebracht, auf die der Schachtverschluss in ähnlicher Auslegung (Widerlager und Dichtelemente) an entsprechender Stelle im oberen Bereich der Wirtsgesteinsformation eingebaut wird.

Relativer Kostenvergleich

Ein Kostenvergleich zwischen den Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz und im Wirtsgestein Ton ist aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes beider Konzepte nur relativ möglich. Verglichen werden können die aus den Wirtsgesteineigenschaften und Einlagerungskonzepten entstehenden zusätzlichen Kostenfaktoren.

Zusätzlich zu den Tagesanlagen für ein Endlagerkonzept im Salz ist für das Verfüllmaterial Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Gemischen ein eigener Logistikstrang zu installieren. Dieser umfasst auch die Herstellung und Lagerhaltung von Bentonitformsteinen für die Streckenlagerung und die Vorbereitung von Endlagergebinden mit Bentonit Umhüllungen.

Bei der Schachtförderung und dem Streckentransport sind à priori keine größeren Kostenunterschiede zwischen beiden Wirtsgesteinen bei der einzusetzenden Maschinenteknik erkennbar.

Der Errichtungs- und Unterhaltungsaufwand für ein Grubengebäude im Wirtsgestein Ton wird deutlich über dem im Wirtsgestein Salz liegen. Die Gründe hierfür sind einerseits in den erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen für den Ton an sich und andererseits in der Größe des Grubengebäudes (Faktor 8 – 9) zu sehen. Gegenüber dem Salzkonzzept ist auch der Schacht bis in den Schachtsumpf auszubauen. Hierauf kann im Salz verzichtet werden.

Ein weiterer Kostenfaktor ist in dem erforderlichen qualitätsgesicherten Einbringen von vergleichsweise teurem Verfüllmaterial Bentonit zu sehen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz	5
2.1	Bergbau im Salz	5
2.2	Beschreibung des technischen Endlagerkonzeptes in Salz	7
2.2.1	Abfallmengenszenarium Konzept Endlager Gorleben – Stand 1998	7
2.2.2	Behälterkonzepte	9
2.2.2.1	POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter	10
2.2.2.2	Brennstabkokille 3 (BSK 3)	11
2.2.2.3	HAW-Kokille	13
2.2.3	Radiologische und thermische Basisdaten für wärmeentwickelnde Abfälle	13
2.2.3.1	Uran-Brennelemente	13
2.2.3.2	Wärmeleistung des POLLUX-10-Behälters über die Zeit	14
2.2.3.3	Wärmeleistung der BSK 3 über die Zeit	14
2.2.3.4	Wärmeleistung einer COGEMA-HAW-Kokille über die Zeit	15
2.2.4	Einlagerungskonzepte	17
2.2.5	Anforderungen an Verfüllmaßnahmen und -materialien sowie Verschlussmaßnahmen	17
2.2.5.1	Anforderungen an die Verfüllmaterialien	18
2.2.5.2	Anforderungen an die Verschlussmaßnahmen	19
2.2.5.3	Verfüll- und Verschlusskonzept	21
2.2.5.4	Verschlusskonzept	23
2.3	Endlagerflächenbedarf bei der „Aktualisierung des Konzepts Endlager Gorleben“	26
3	Endlagerkonzept im Wirtsgestein Ton	29
3.1	Bergmännische Erfahrungen in Ton	30
3.1.1	Streckenauffahrung und -ausbau in Tiefbauen mit 15 - 80 m Teufe	30
3.1.2	Streckenauffahrung und -ausbau in tonigen Gesteinsformationen der Schachanlage Konrad	32
3.1.3	Bohren in Ton	36
3.1.3.1	Erbohrung von Kernen in Ton	36
3.1.3.2	Aufweiten der Bohrung auf Endquerschnitt	38
3.1.3.3	Einbringen einer GFK – Schutzverrohrung	39
3.1.3.4	Bohrgerät	40
3.1.4	Auswertung der bergmännischen Erfahrungen in Ton	41
3.2	Beschreibung des „Technischen Endlagerkonzeptes in Ton“	41
3.2.1	Abfallmengenszenarium - Stand 2002	42
3.2.2	Behälterkonzepte und -materialien	43
3.2.2.1	Internationale Behälterkonzepte und Materialien in Ton	44

3.2.2.2	Konditionierung und Standzeiten	49
3.2.2.3	Korrosionsverhalten von Werkstoffen für Endlagerbehälter in Ton	51
3.2.2.4	Auswahl der Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente und HAW-Kokillen	55
3.2.3	Thermische Endlagerauslegung für die Streckenlagerung von POLLUX-Endlagerbehältern	59
3.2.3.1	Wärmeleistung der POLLUX-Behälter über die Zeit	60
3.2.3.2	Auslegungsberechnungen – Berechnungsmethode - Modellgebiet	61
3.2.3.3	Modellbeschreibung - Geometrie des Modells / Modellgröße und Randbedingungen	62
3.2.3.4	Ermittlung der Zwischenlagerzeit	67
3.2.3.5	Ermittlung des Behälterabstandes d	67
3.2.3.6	Ermittlung des Streckenabstandes a_s	68
3.2.3.7	Ermittlung der erforderlichen Feldesgröße	70
3.2.4	Thermische Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen	74
3.2.4.1	Auslegungsberechnungen - Berechnungsmethode - Modellgebiet	74
3.2.4.2	Modellbeschreibung - Geometrie des Modells/Modellgröße und Randbedingungen	75
3.2.4.3	Ermittlung der Zwischenlagerzeit	78
3.2.4.4	Ermittlung des Behälterabstandes d	79
3.2.4.5	Ermittlung des Bohrlochabstandes a_b	80
3.2.4.6	Ermittlung der erforderlichen Feldesgröße	81
3.2.5	Thermische Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)	86
3.2.5.1	Wärmeleistung der Brennstab-Kokille über die Zeit	86
3.2.5.2	Auslegungsberechnungen – Berechnungsmethode - Modellgebiet	87
3.2.5.3	Modellbeschreibung - Geometrie des Modells/Modellgröße und Randbedingungen	88
3.2.5.4	Ermittlung der Zwischenlagerzeit	92
3.2.5.5	Ermittlung des Behälterabstandes d	93
3.2.5.6	Ermittlung des Bohrlochabstandes a_b	93
3.2.5.7	Ermittlung der erforderlichen Feldesgröße	96
3.3	Verfüll- und Verschlusskonzept	100
3.3.1	Internationale Verfüll- und Verschlusskonzepte	100
3.3.1.1	Belgien	101
3.3.1.2	Frankreich	102
3.3.1.3	Schweiz	105
3.3.1.4	Spanien	107
3.3.2	Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien	108
3.3.3	Verfüll- und Verschlussmaterialien	110
3.3.3.1	Bentonitarten	111
3.3.3.2	Bentoniteigenschaften	116
3.3.3.3	Bentonit-Zuschlagstoff-Gemische	122

3.3.3.4	Betone	124
3.3.4	Zusammenfassender Überblick über Tonformationen in Deutschland	126
3.3.4.1	Opalinuston im süddeutschen Molassebecken	127
3.3.4.2	Unterkreide-Tone im Norddeutschen Becken	129
3.3.5	Verschlusskonzept für Modellendlager im Norddeutschen Becken und im Süddeutschen Molassebecken	131
3.3.6	Auswahl der geeigneten Bentonitart	133
3.3.6.1	Vergleich zwischen Natrium (Na)- und Calcium (Ca)-Bentonit	135
3.3.6.2	Festlegung auf Ca-Bentonit	138
3.3.7	Konzept der Streckenverfüllungen und -verschlüsse	139
3.3.8	Konzept der Schachtverfüllung und des Schachtverschlusses	141
3.3.8.1	Schachtverschluss für das Modell Süddeutsches Molassebecken (Opalinuston)	141
3.3.8.2	Schachtverschluss für das Niedersächsisches Becken (Unterkreide Tone)	143
4	Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton	145
4.1	Bergbau in den Wirtsgesteinen	145
4.2	Endlagerbehälterkonzepte	145
4.3	Erforderliche Endlagerflächen	146
4.4	Verfüll- und Verschlusskonzept	151
4.5	Kosten	151
5	Literaturverzeichnis	153
6	Abbildungsverzeichnis	165
7	Tabellenverzeichnis	169
8	Abkürzungsverzeichnis	171
9	Verzeichnis der Anlagenbände	173

1 Einleitung

Mit der Entscheidung der Bundesregierung neben dem Endlagermedium Salz auch andere geologische Formationen auf ihre Eignung als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle zu untersuchen, ergibt sich auch die Notwendigkeit, grundlegende konzeptionelle Ansätze für ein generisches Endlager in nichtsalinarem Gestein zu entwickeln.

Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salz werden in der Bundesrepublik Deutschland seit mehr als 30 Jahren durchgeführt. Im Rahmen einer Vorstudie fasste das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie 1979 den bis dahin vorliegenden Kenntnisstand zur Direkten Endlagerung zusammen. In dem auf diesen Ergebnissen aufbauenden Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt Andere Entsorgungstechniken wurde in den Jahren 1981 bis 1984 ein technisches Konzept für die Direkte Endlagerung entwickelt und ein umfassender Vergleich der beiden Entsorgungswege mit und ohne Wiederaufarbeitung angestellt. Die Bundesregierung entschied auf Grundlage der dabei erzielten Ergebnisse, die Arbeiten zur Direkten Endlagerung bis zur Anwendungsreife weiterzuführen. In diesem Zusammenhang wurden von 1985 bis 1993 sowohl Demonstrationsvorhaben als auch systemanalytische Arbeiten durchgeführt. Während in den Demonstrationsversuchen technische Komponenten entwickelt und erprobt wurden, dienten die Systemanalyse Mischkonzept (SAM) /1-1/ und die Systemanalyse Endlagerkonzepte (SEK) /1-2/ dazu, für unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen vollständige Entsorgungssysteme zu erarbeiten und hinsichtlich Sicherheit, technischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Seit 1979 wurde der Salzstock Gorleben auf seine Eignung als Endlager für alle Arten fester radioaktiver Abfälle untersucht. Über zwei Schächte und entsprechende Strecken wurde der Salzstock in 840 m Teufe bis zum Moratorium 2000 großräumig erschlossen und geowissenschaftlich erkundet. Nach Feststellung der Eignung aufgrund der Erkundungsergebnisse sollte sich das atomrechtliche Genehmigungsverfahren mit dem Ziel der Errichtung und des Betriebes des Endlagers anschließen. Um dieses Ziel wirksam erreichen zu können, war es erforderlich, ein Konzept für eine durchzuführende Planung zu erstellen. Das Planungskonzept sollte parallel zur untertägigen Erkundung des Salzstockes durchgeführt werden und die Grundlage für standortspezifische Sicherheitsanalysen, die für den Eignungsnachweis des Salzstockes notwendig sind, bilden.

Ende der 90er Jahre wurde spezifisch für den Standort Gorleben auf Basis der bis dahin bekannten Erkundungsergebnisse und einer präzisierten Abfallprognose bis 2080 eine Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben /1-3/ erarbeitet. Insofern liegen Untersuchungs- und Planungsergebnisse für ein Endlager im Salz in einem

hinreichenden Tiefgang vor, der für eine vergleichende Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in anderen geologischen Formationen erforderlich ist.

Zielsetzung des nachfolgend beschriebenen Vorhabens ist es, die Grundlagen für eine Gegenüberstellung eines generischen Endlagers im Salz und eines im Tongestein unter vergleichbaren Randbedingungen zu schaffen. Dazu sind die wesentlichen Unterschiede der beiden Konzepte herauszuarbeiten und ihre Auswirkungen in Bezug auf Sicherheit, technische Machbarkeit und Kosten zu analysieren. Ausgehend von dieser allgemeinen Zielsetzung wurden umfangreiche Planungen und Untersuchungen durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse in einem zusammenfassenden Hauptband /1-4/ und 6 Anlagenbände (A1 – A6) dargestellt.

Die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für ein Endlager im Tongestein wurden für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Berücksichtigung fanden dabei die zugrundeliegenden Endlagerszenarien, Behälterkonzepte und Materialien, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerauslegung und -technik, Sicherheitsnachweis-konzepte sowie Terminpläne und Kostenansätze für die Realisierbarkeit der Endlager (Anlagenband 1) /1-5/.

Betrachtungen zur Sicherheit in der Betriebsphase wurden thematisch für den betrieblichen Strahlenschutz, hinsichtlich der Kritikalität beim Endlagerkonzept im Ton und für Safeguardsmaßnahmen in der Betriebsphase durchgeführt. Als eine erste Grundlage für die Einlagerungstechnologie wurde eine Abschirmrechnung für eine mit Bentonit ummantelte HAW-Kokille durchgeführt (Anlagenband 3) /1-6/.

Betrachtungen zur Sicherheit in der Nachbetriebsphase wurden hinsichtlich Langzeitsicherheit, Kritikalitätssicherheit und Safeguardsaspekten durchgeführt (Anlagenband 4) /1-7/.

Ein Vergleich der Wirtsgesteine Ton/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens schließen das Vorhaben ab. Darin enthalten sind die Anforderungen an ein Wirtsgestein, die geologische Situation im Süddeutschen Molassebecken und in der Norddeutschen Senke, die Evaporitgesteine in der Norddeutschen Senke, Mineralogie, Temperaturumfeld der Gesteine und ihre Explorierbarkeit (Anlagenband 5) /1-8/.

Auswirkungen auf den Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers haben die wesentlichen Unterschiede des chemisch/mineralischen Stoffbestandes und damit die Materialeigenschaften der Wirtsgesteine Salz und Ton. So sind bei der Endlagerung im Ton zusätzlich chemische Rückhaltemechanismen wie die Sorption von Radionukliden zu betrachten. Im Ton sind des Weiteren Prozesse nicht auszuschließen, die das Rückhaltevermögen chemischer Barrieren und die Abdichtfunktion hydraulischer Bar-

rieren beeinflussen können. Darüber hinaus werden die chemisch/mineralogischen Charakteristika von Evaporit- und Tonsedimenten sowie von Verfüll- und Abdichtmaterialien beschrieben (Anlagenband 6) /1-9/.

Im vorliegenden Anlagenband 2 wurde ein generisches technisches Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Ton mit einem solchen Tiefgang entwickelt, dass ein vergleichende Gegenüberstellung mit dem generischen Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz möglich war.

Für das Salzkonzzept wurden dazu zusammengestellt

- Bergbau im Wirtsgestein Salz
- Abfallmengenszenarium 1998
- Behälterkonzepte
- Radiologische und thermische Basisdaten zum Abfall
- Verfüll- und Verschlussmaßnahmen
- Endlagerflächenbedarf bei der - Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“ -

Für das Tonkonzept wurden neu erarbeitet und zusammengestellt:

- Bergbau im Wirtsgestein Ton
- Abfallmengenszenarium 2002
- International geplante Behälterkonzepte und -materialien im Ton
- Verfüll- und Verschlussmaßnahmen
- Thermische Endlagerauslegung für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern sowie für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen und Brennstabkokillen

Der abschließende Vergleich der technischen Endlagerkonzepte in Salz und Ton erfolgt in den Bereichen

- Bergbau in den Wirtsgesteinen
- Endlagerbehälterkonzepte
- Erforderliche Endlagerflächen
- Relativer Kostenvergleich

2 Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz

Im Folgenden werden die Grundlagen und Randbedingungen sowie die Grundzüge des deutschen Endlagerkonzeptes im Wirtsgestein Salz zusammenfassend dargestellt. Weitere Details können den entsprechenden Literaturstellen entnommen werden.

2.1 Bergbau im Salz

Salz ist ein mineralischer Rohstoff, der seit jeher von besonderer Bedeutung für den Menschen war. Das zunächst nur zu Ernährungszwecken geförderte Salz ist heute wichtiger Grundstoff der Chemie und der Kunstdüngerherstellung. Nachdem Justus von Liebig den Wert der Kalisalze für die landwirtschaftliche Düngung erkannt hatte, begann 1861 die Entwicklung der Kaliindustrie.

Seit mehr als 100 Jahren wird Tiefbergbau auf Salzmineralien in Deutschland durchgeführt. Die heutzutage aktiven Bergwerke stehen mehrheitlich seit 100 Jahren in der Gewinnung. Aufgrund der Entwicklung des Weltmarktes musste eine Vielzahl von Bergwerken geschlossen werden. Kali wird heute noch an 6 Standorten - (Werra-Gebiet (Hessen-Thüringen), Zielitz (Sachsen-Anhalt), Sigmundshall (Niedersachsen) und Neuhaus (Hessen)) abgebaut. In Betrieb befindliche Salzbergwerke sind in Borth (NRW), Braunschweig-Lüneburg (Niedersachsen) und Bernburg (Sachsen-Anhalt) zu finden. Das Bergwerk Niedersachsen Riedel, das die bis heute größte Abbauteufe (1525 m) erreicht hatte, wurde 1996 aus der Produktion genommen.

Die Herstellung untertägiger Hohlräume im Salz erfolgt entweder durch Bohren und Sprengen oder durch Fräsen mit sogenannten Teilschnittmaschinen. Die Standfestigkeit des Gebirges nach Auffahren von Strecken oder Kammern erlaubt es, auf einen Ausbau wie in der Steinkohle oder Ton zu verzichten (Abbildung 2-1). Wenn Strecken und Kammern über lange Zeiten genutzt werden sollen, werden üblicherweise nur Anker und Netze gegen Steinfall aus der Firste gesetzt (Abbildung 2-2). Da Salz auch viskoplastische Eigenschaften hat, ist während des Bergwerkbetriebes in regelmäßigen Abständen das Profil der Strecken und Kammern nachzuschneiden bzw. zu berauben (Abbildung 2-3). So lassen sich Bergwerke über viele Jahrzehnte offen halten und betreiben.

Das Bohren im Salz ist ein gängiges Verfahren, um Bohrlöcher aus unterschiedlichsten Gründen zu erstellen. Dieses sind z. B.:

- Erstellung von Bohrungen ($\varnothing$ ca. 36 mm) zur Durchführung des Bohr- und Sprengverfahrens wobei diese mit Sprengstoff gefüllt und gezündet werden, um einerseits Strecken- und Kammern aufzufahren und andererseits um Mineralien zu gewinnen

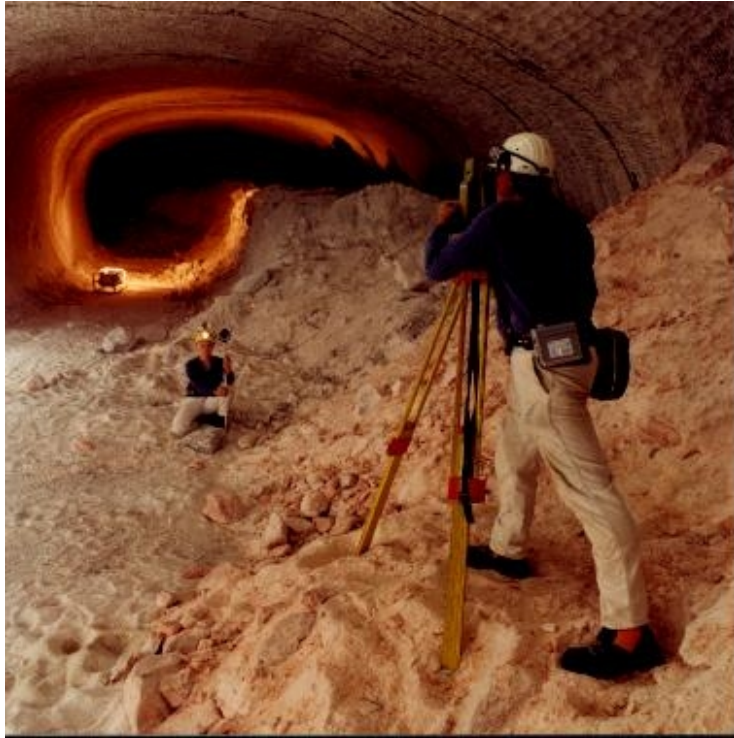


Abbildung 2-1: Strecke im Salz



Abbildung 2-2: Kfz-Werkstatt mit Anker und Netzen

- Erstellung von Bohrungen ($\varnothing$ ca. 42 – 52 mm) als Erkundungsbohrungen zur Feststellung der Geologie in Bohrrichtung bzw. zur Überprüfung auf Gas- und Lösungsvorkommen
- Erstellung von Großbohrlöchern ($\varnothing$ ca. 800 – 1400 mm) für Bewetterungszwecke



Abbildung 2-3: Beraubung der Firste

2.2 Beschreibung des technischen Endlagerkonzeptes in Salz

Auf Basis der im Rahmen der Novellierung der Endlagervorausleistungsverordnung verwendeten Abfallerhebungsdaten von 05/97 wurde im Abschlussbericht „Aktualisierung des Konzeptes – Endlager Gorleben“ 1998 /2-1/ ein Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz umfangreich beschrieben. Seitdem wurden keine weiteren umfassenden Endlagerplanungen für wärmeentwickelnde Abfälle seitens BfS durchgeführt.

2.2.1 Abfallmengenszenarium Konzept Endlager Gorleben – Stand 1998

Der Anfallzeitpunkt der einzulagernden radioaktiven Abfälle, die Zeitdauer des Anfalls, die zu erwartenden Volumina und die Art der entsprechenden Endlagergebäude sind entscheidend für die Auslegung eines Endlagers. Darauf aufbauend kann ein Endlagerkonzept entwickelt werden, das alle Phasen eines Endlagers wie Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung erfasst.

Basis für das verwendete Endlagerkonzept waren die Daten des o. g. Abfallmengenerrüsts über den kumulierten Bestand und die Prognosen des zukünftigen Anfalls aller Arten von radioaktiven Abfällen. Hierzu wurden Informationen zur Verfügung gestellt, über die Art der Abfälle, die jeweiligen Mengen, die Konditionierungsform sowie für wärmeerzeugende verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente die Nachzerfallswärme als Funktion der Zeit.

Wärmeerzeugende Abfälle, insbesondere verglaste radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente, fallen beim Betrieb von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sowie von Wiederaufarbeitungsanlagen an. Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung stammen aus der Wiederaufarbeitung und Konditionierung ausgedienter Brennelemente, aus dem Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken, aus Forschungszentren, aus der kerntechnischen Industrie, den Landessammelstellen und von sonstigen Ablieferungspflichtigen sowie aus der Stilllegung und dem Rückbau kerntechnischer Anlagen. Daten über die endzulagernden radioaktiven Abfälle wurden von den Kernkraftwerksbetreibern und den Betreibern von Wiederaufarbeitungsanlagen über die Gesellschaft für Nuklearservice (GNS) zur Verfügung gestellt. Prognosen über die zukünftige Entwicklung erstellte die Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW). Weiterhin wurden Daten des Bundesamtes für Strahlenschutz aus seinen jährlichen Erhebungen verwendet /2-2/.

Die Grundannahme des Basis-Szenariums war der 50jährige Betrieb bestehender Kernkraftwerke inkl. des Kernkraftwerkes Mülheim-Kärlich (KMK) ohne Ersatzzubau. Nach dem Auslaufen der "Service Agreements" mit Cogema und BNFL zum 01.07.2005 werden die dann anfallenden ausgedienten Brennelemente direkt eingelagert. Die wiederaufgearbeiteten ausgedienten Brennelemente werden u.a. als verglaster radioaktiver Abfall zurückgeführt. Die Zwischenlagerzeit für die ausgedienten Brennelemente und die WA-Abfälle von der Reaktorentnahme bis zur Endlagerung richtet sich nach den thermischen und geomechanischen Endlagerauslegungen. Kernkraftwerke werden innerhalb von 10 Jahren nach der Stilllegung abgebaut. Das hat zur Folge, dass bei der Annahme eines Endlagerbetriebsbeginns im Jahr 2013 bis zum Jahr 2080 das Endlager stillgelegt und dann verschlossen werden kann.

Nach Angaben der Industrie entstehen aus den Wiederaufarbeitungsverträgen mit COGEMA und BNFL die in Tabelle 2-1 genannten Mengen an wärmeentwickelnden Abfall.

	Verglaster HAW (Kokillen)	CSD-C-Kokillen	aus Entlademenge tSM
COGEMA	2.800	max. 7.000	4.584
BNFL	700	-	884
Summe	3.500	7.000	5.468

Tabelle 2-1: Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfall aus Wiederaufarbeitung

Nach weiteren Angaben der Industrie sollten bis zum Jahr 2040 insgesamt eine Entlademenge von 24.030 t SM aus allen Kernkraftwerken anfallen. Unter Berücksichtigung der 5.536 t SM incl. 68 t SM des KKW Stade ohne Abfallrücknahme, die wieder aufgearbeitet werden, sowie zusätzlicher 634 t SM von den Energiewerken Nord (EWN), ergibt sich eine Masse von 19.128 t SM für das Basis-Szenarium. Diese wird unter Vernachlässigung der unterschiedlichen Brennelementtypen in eine Anzahl von Endlagergebinden umgerechnet und aufgerundet. In Tabelle 2-2 ist die Anzahl der erforderlichen Gebinde für die Direkte Endlagerung von 19.128 t SM in Abhängigkeit vom gewählten Gebindetyp aufgeführt. Die Behälter werden in einer Konditionierungsanlage mit den Stäben der Brennelemente beladen. Die Kopf- und Fußstücke sowie die Abstandshalter können in CSD-C-Kokillen verpackt werden.

Endlagergebinde	POLLUX-8-DWR	POLLUX-10-DWR	Endlagerbüchse-3 BE (heute BSK 3)
Masse pro Gebinde	4,3 t SM	5,4 t SM	1,6 t SM
Anzahl der Gebinde	4.449	3.543	11.955

Tabelle 2-2: Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung nach Gebindealternativen

Diese Werte für die Gebindeanzahl wurden für die weitere vorkonzeptionelle Planung zur Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben zugrunde gelegt.

2.2.2 Behälterkonzepte

Mit der Novelle des Atomgesetzes im Jahre 1994 wurde die Direkte Endlagerung von Brennelementen in Deutschland als ein möglicher Entsorgungsnachweis gesetzlich festgeschrieben. Aktive endlagerfähige Gebinde für diesen Entsorgungsweg sind bis-

her weltweit noch nicht hergestellt worden. Technisch erprobt werden soll diese Konditionierungsform der bestrahlten Brennelemente zur Herstellung endlagerfähiger Gebinde erstmalig in der Pilotkonditionierungsanlage (PKA), die am Standort des Zwischenlagers in Gorleben errichtet wurde.

In der PKA werden die Brennelemente in ihre Stäbe, Endstücke und sonstige Strukturteile zerlegt. Die Stäbe werden in speziell für die Direkte Endlagerung konzipierte Behälter eingefüllt und durch Aufschweißen eines Deckels fest eingeschlossen. Das zugrunde gelegte Referenzkonzept ist die Verbringung der Endlagergebinde in ein Endlager in einer Salzformation.

Für die derzeit in Betracht gezogenen Einlagerungskonzepte bei der Direkten Endlagerung wurden zwei Behälter- bzw. Gebindetypen entwickelt:

- der vollabgeschirmte POLLUX-Behälter für die Streckenlagerung und
- die in ihren Abmessungen einer verlängerten Glaskokille entsprechende Brennstabkokille (BSK) für die Bohrlochlagerung.

Hinzu kommen:

- HAW-Kokillen für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle,
- CSD-C-Kokillen für Technologieabfälle der WA und für BE-Hülsen sowie Strukturteile.

2.2.2.1 POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter

Der POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter (s. Abbildung 2-4) wurde zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus 10 DWR-U-Brennelementen bzw. 30 SWR-BE entworfen. Der Unterschied des POLLUX-10-Behälters zum ursprünglichen im Rahmen des FuE-Programms zur Direkten Endlagerung entwickelten POLLUX-8-Behälter besteht darin, dass in dem innen angeordneten, quadratischen Korb anstatt gepresster Strukturelemente zusätzlich die Stäbe zweier Brennelemente eingebracht werden.

Der Behälter ist zweischalig aufgebaut. Der Innenbehälter, der eigentliche Endlagerbehälter, ist so ausgelegt, dass er einem isostatischen Gebirgsdruck von 30 MPa standhält und den Einschluss der Radionuklide gewährleistet. Zur Abschirmung ist der Endlagerbehälter von einem Behälter aus Sphäroguss mit innenliegenden Bohrungen, die mit Polyäthylenstäben zur Neutronenmoderation ausgefüllt sind, umgeben. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem Schraubdeckel verschlossen.

Die Einbauten des POLLUX dienen der Aufnahme der Brennstabbüchsen. Die quadratische Zentralposition nimmt entweder eine Büchse mit Brennstäben von zwei DWR-BE oder die kompaktierten Brennelementskelette auf. Durch vier Leitbleche wird die quadratische Zentralposition im Endlagerbehälter zentriert. In die vier verbleibenden Fächer werden vier Büchsen eingesetzt, die die Brennstäbe von jeweils zwei Druckwasserreaktor- oder sechs Siedewasserreaktor-Brennelementen aufnehmen.

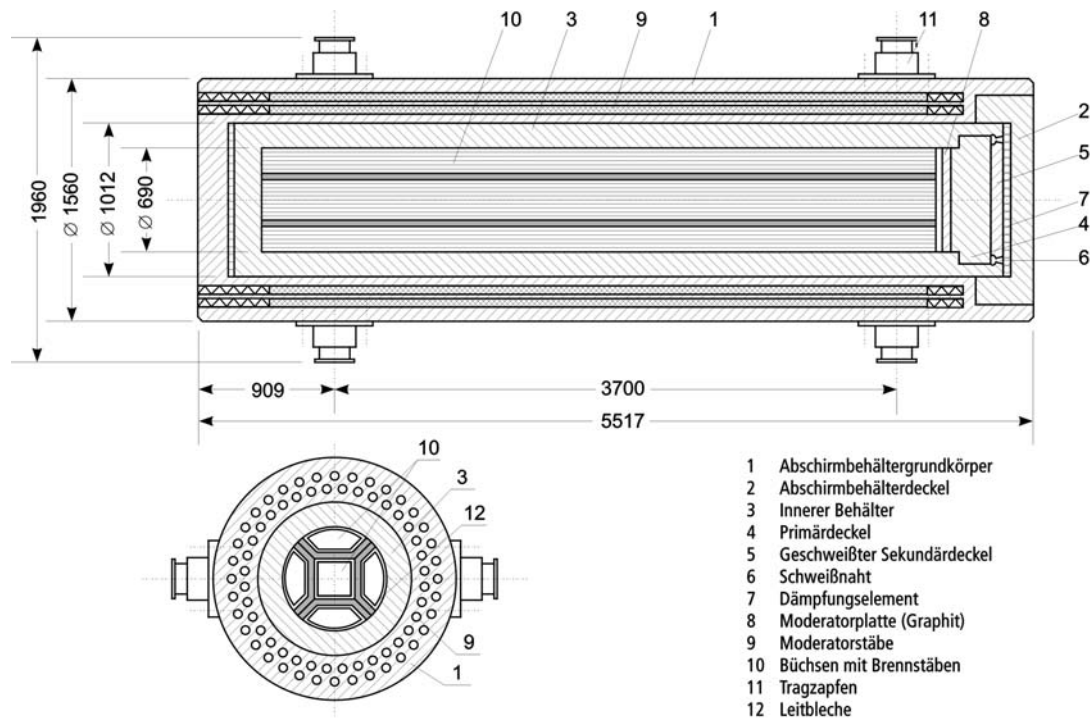


Abbildung 2-4: POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter /2-3/

2.2.2.2 Brennstabkokille 3 (BSK 3)

Die Brennstabkokille 3, (s. Abbildung 2-5) wurde als Alternative zum POLLUX-System zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus drei DWR-Brennelementen oder 9 SWR-Brennelementen (in zwei Brennstabbüchsen) entworfen. Die Geometrie des Behälters (mit Ausnahme der Länge) korrespondiert weitgehend zur HAW-Kokille. Dies eröffnet die Möglichkeit der Handhabung mit weitgehend identischen Hebezeugen und die Einlagerung in gleichkalibrigen Bohrlöchern.

Die BSK 3 besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Die Befüllung erfolgt wie bei den Brennstabbüchsen der POLLUX-Behälter in der Pilotkonditionierungsanlage.

Der Behälterkörper der BSK 3 besteht aus niedrig legiertem, ferritischem Feinkornbaustahl, der gute Schweiß-, Verarbeitungs- und Korrosionseigenschaften besitzt. Die

Gebirgslasten werden von der BSK 3 und der dichten Stabpackung in ihrem Inneren sicher abgetragen.

Der innere Schachtraum wird zunächst durch Verschrauben mit einem Abschirmdeckel verschlossen. In einer Aussparung in der Deckelunterseite wird eine Moderatorplatte zur Verbesserung der Neutronenmoderation und somit zur Verringerung der Neutronendosis eingelegt. Zur Minderung der Strahlenexposition bei Hantierungsarbeiten an den Verschlusssystemen der Transportbehälter ist die Brennstabkokille im Kopfbereich zusätzlich abgeschirmt. Die Dicke des Abschirmdeckels und des Moderators ist so gewählt, dass die Summe aus γ - und Neutronendosis an der Oberfläche 0,1 mSv/h nicht übersteigt. Anschließend wird ein Schweißdeckel angebracht und nach dem Engspalt-Schweißverfahren mit dem Behälterkörper verschweißt. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf.

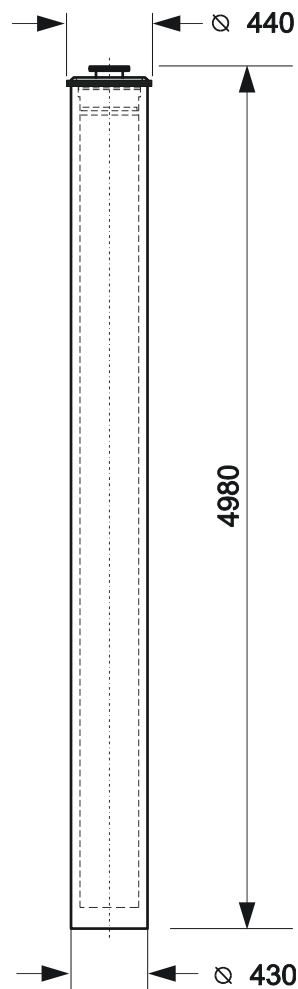


Abbildung 2-5: Brennstabkokille 3 (BSK 3)

2.2.2.3 HAW-Kokille

Die beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehende wässrige Spaltprodukt-Lösung wird aufkonzentriert und in einem keramischen Schmelzer mit Glasfritte zu einem Borosilikatglasprodukt verarbeitet. Die flüssige Glasschmelze wird dann in einen Edelstahlbehälter mit 5 mm Wandstärke abgefüllt, der wiederum mit einem Deckel verschweißt wird. Eine sogenannte COGEMA-HAW-Kokille (s. Abbildung 2-6) enthält das Äquivalent von ca. 1,67 tSM.

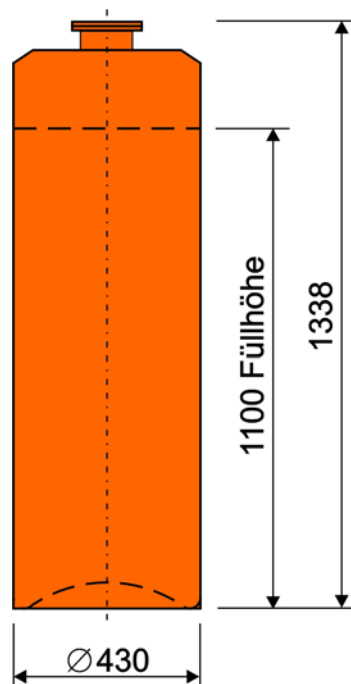


Abbildung 2-6: COGEMA-HAW-Kokille

2.2.3 Radiologische und thermische Basisdaten für wärmeentwickelnde Abfälle

Die folgenden radiologischen und thermischen Daten der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle sind /2-1/ entnommen.

2.2.3.1 Uran-Brennelemente

Als Referenzelement wird ein DWR-Uran-Brennelement (DWR-U-BE) mit einer Anreicherung von 4 % und einem durchschnittlichen Abbrand von 50 GWd/t SM zu Grunde gelegt. Zur Verfügung gestellt wurden durch GNS die Ergebnisse der Abbrandberechnungen für Uran-Brennelemente für 10 Zeitpunkte einerseits im Zeitraum zwischen 15

und 500 Jahren und andererseits von 1 bis 1 Mio. Jahren nach Reaktorentnahme. Abbildung 2-7 zeigt die Wärmeleistung von DWR-U-BE (Typ: GKN-2, ideal) über die Zeit bis 200 Jahre nach Reaktorentnahme.

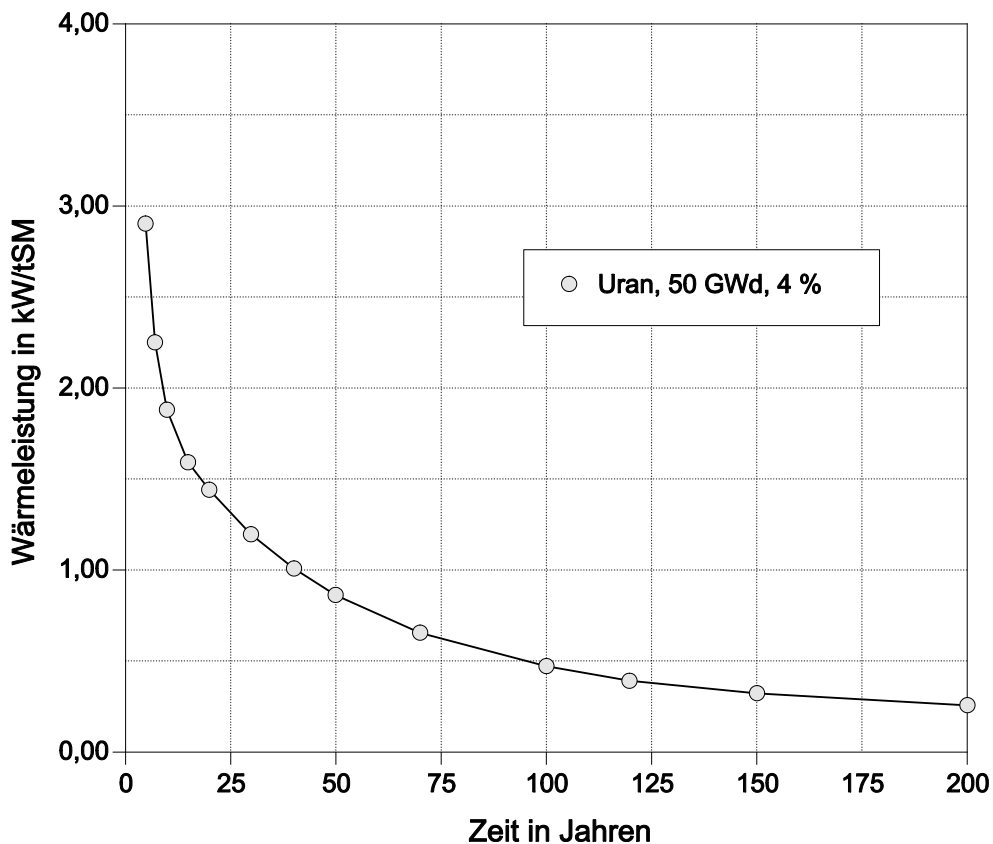


Abbildung 2-7: Wärmeleistung von Uran-Brennelementen über die Zeit mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung bezogen auf tSM

2.2.3.2 Wärmeleistung des POLLUX-10-Behälters über die Zeit

In Tabelle 2-3 sind Wärmeleistungen für den Endlagerbehälter POLLUX-10 (beladen mit Stäben aus 10 Brennelementen) für das Referenz-Brennelement dargestellt.

2.2.3.3 Wärmeleistung der BSK 3 über die Zeit

In Tabelle 2-4 sind Wärmeleistungen für den Endlagerbehälter BSK 3 (Brennstabkockille beladen mit Stäben aus drei Brennelementen) für das Referenz-Brennelement dargestellt.

Zeit [a]	POLLUX-10-Behälter 5,4 t SM [kW]
1	70,74
2	39,47
5	15,66
6	12,15
10	10,10
15	8,59
20	7,70
30	6,43
40	5,40
50	4,63
70	3,52
100	2,53
120	2,13
150	1,75
200	1,40
500	0,77
1.000	0,44
10.000	0,10
100.000	0,01
1.000.000	~ 0,00

Tabelle 2-3: Wärmeleistung des Endlagerbehälters POLLUX-10 über die Zeit für DWR-Uran-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U₂₃₅ Anreicherung

2.2.3.4 Wärmeleistung einer COGEMA-HAW-Kokille über die Zeit

In Tabelle 2-5 ist die Wärmeleistung einer HAW-Kokille zu verschiedenen Zeiten nach Reaktorentladung des Brennstoffs angegeben. Für das Alter des enthaltenen Kernbrennstoffs wurde für die Wiederaufarbeitung 3 Jahre nach Reaktorentladung und für die Verglasung 4 Jahre nach Reaktorentladung ein Abbrand von 33 GWd/tSM beispielhaft zugrunde gelegt. Bis zur Beendigung der Wiederaufarbeitung ist mit höheren Abbränden zu rechnen.

Zeit [a]	BSK 3 1,6 t SM [kW]
Entladung	3.061,80
1	21,22
2	11,84
5	4,70
6	3,65
10	3,03
15	2,58
20	2,32
30	1,93
40	1,62
50	1,39
70	1,05
100	0,76
120	0,64
150	0,52
200	0,42
500	0,23
1.000	0,13
10.000	0,03
100.000	0,00
1.000.000	0,00

Tabelle 2-4: Wärmeleistung des Endlagerbehälters BSK 3 über die Zeit für DWR-Uran-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung

Zeit[a]	6	8	10	13	33	73	104
Wärmeleistung[W] Kokille	1745	1500	1260	1120	670	275	151

Tabelle 2-5: Wärmeleistung einer COGEMA-HAW-Kokille in Abhängigkeit von Abbrand, Wiederaufarbeitung und Verglasung nach Reaktorentnahme des Brennstoffs

2.2.4 Einlagerungskonzepte

In dem Bericht „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ /2-1/ wurden drei verschiedene Einlagerungskonzepte für wärmeentwickelnde Abfälle untersucht.

Beim ersten Konzept (Variante 1), einer Kombination von Strecken- und Bohrlochlagerung, werden die ausgedienten Brennelemente in POLLUX-8-Behältern auf der 870 m-Sohle (Einlagerungssohle) in Strecken eingelagert. Die HAW- und CSD-C-Kokillen werden in 300 m tiefe vertikale Bohrlöcher verbracht. Variante 1 ist die Zusammenführung des ursprünglichen BfS-Konzepts /2-4/ der reinen Bohrlochlagerung von hochaktiven Abfällen bei ausschließlicher Wiederaufarbeitung mit der Streckenlagerung ausgedienter Brennelemente aus den Ergebnissen der FuE-Arbeiten zur direkten Endlagerung.

Das zweite Konzept (Variante 2) sieht eine reine Bohrlochlagerung vor. Dabei werden sowohl ausgediente Brennelemente, konditioniert in Form von Endlagerbüchsen (sogenannte Brennstabkokillen), als auch HAW- und CSD-C-Kokillen in 300 m tiefe vertikale Bohrlöcher, eingelagert. Die entsprechenden Bohrungen werden von der Sohle der Einlagerungsstrecke aus gestoßen.

Das dritte Konzept (Variante 3) ist dem ersten Konzept ähnlich. Die ausgedienten Brennelemente werden bei diesem Konzept auch in Strecken eingelagert. Die HAW- und CSD-C-Kokillen werden in 30 m statt in 300 m tiefe Bohrlöcher eingebracht.

2.2.5 Anforderungen an Verfüllmaßnahmen und -materialien sowie Verschlussmaßnahmen

Aus der Nutzung des Endlagerbergwerkes im Wirtsgestein Salz (z. B. Änderung des Primärspannungszustandes durch Auffahren der Gruben Hohlräume, Wärmeeintrag ins Gebirge durch Einlagerung von hochaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen) lassen sich die maßgeblichen Szenarien ableiten und Art und Umfang der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen entscheidend bestimmen.

In der Nachbetriebsphase lassen sich

- die Zuflüsse von Wässern aus dem Neben- und Deckgebirge
- begrenzte Zuflüsse aus Reservoirs im Salzstock

nicht sicher ausschließen. Auf Grund intensiver vorlaufender Erkundungen sind diese Szenarien in der Betriebsphase nicht zu erwarten und werden daher zurzeit nicht weiter berücksichtigt.

Allgemeine Anforderungen an die Verfüllung des Endlagerbergwerkes und an Verschlussmaßnahmen sind in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle /2-5/ aufgeführt. Darüber hinaus gilt die Strahlenschutzverordnung und u. a. das dort ausgewiesene Minimierungsgebot, aus dem entsprechende Sicherheitsvorkehrungen abzuleiten sind.

Neben diesen allgemeinen Anforderungen lassen sich folgende Einzelanforderungen an die Verfüllmaßnahmen, -materialien und die Verschlussbauwerke herleiten.

- Während oder nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle ist der verbleibende Hohlraum in den Einlagerungsräumen mit geeignetem Versatzmaterial zu verfüllen
- Bei anderen untertägigen Hohlräumen, die abgeworfen werden, ist ebenso zu verfahren
- Mit Abfällen befüllte und mit Versatzmaterial verfüllte Teile der Einlagerungsfelder sowie vollständig versetzte Felder werden abgeworfen
- Die Anzahl offener Einlagerungsräume ist zu minimieren
- Die Offenhaltungszeiten der Einlagerungsräume sind so kurzzeitig wie möglich zu halten und nach der jeweiligen Benutzung zu verschließen

2.2.5.1 Anforderungen an die Verfüllmaterialien

An das Material zur Verfüllung des Resthohlraumes in den Einlagerungsstrecken und -kammern sowie der übrigen Hohlräume des Grubengebäudes gelten folgende Anforderungen

Das Versatzmaterial muss

- zur mechanischen Stabilisierung der natürlichen geologischen Barriere Salzgestein dienen
- zur Ableitung der Zerfallswärme aus wärmeentwickelnden Abfällen (HAW, Brennelemente) beitragen
- zur Reduzierung des potentiellen Aufnahmevermögens für Fluide (im Störfall) führen
- zur Minimierung der radiologischen Belastung des Personals in der Betriebsphase führen
- die Anforderungen aus dem Grundwasserschutz erfüllen /2-6/

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager“ /2-7/ wurde weiterhin beispielhaft die Wirkungsweise einer zu den Permeationsbarrieren diversitär wirkenden geochemischen Barriere untersucht. Sie wird im Falle eines Laugenzutritts bzw. Laugeneinbruchs wirksam. Ihre Aufgabe ist es, die Freisetzung zu begrenzen und somit das radiologische Risiko. Dabei stellt im Salinar die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre infolge eines Laugenein-

bruchs im Sinne der ICRP 46 /2-8/ ein unstetiges Ereignis dar, das nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

Als geochemische Barriere wurde das Einbringen von Hydroxylapatit (HAP) im Nahbereich der Endlagergebinde betrachtet. Hydroxylapatit wurde deshalb als Zuschlagstoff zum Versatzmaterial Salzgrus ausgewählt, da die thermodynamische Stabilität der Reaktionsprodukte (Phosphate) mit den maßgeblichen Radionukliden, insbesondere mit Aktiniden, unter endlagerrelevanten Bedingungen gesichert erscheint. Neben der Kenntnis der Reaktionskinetik sind natürliche Analoga aus der Lagerstättenkunde bekannt, die belegen, dass sicherheitsrelevante Aktinide langfristig als schwerlösliche Phosphate gebunden werden können und dementsprechend der Nachweis für einen hinreichend langen Zeitraum geführt werden kann /2-7/.

2.2.5.2 Anforderungen an die Verschlussmaßnahmen

Zu den Verschlussmaßnahmen werden folgende Bauwerke gezählt:

- Bohrlochverschlüsse für die mit HAW-Kokillen und ausgedienten Brennelementen befüllten Bohrlöcher
- Streckenverschlüsse zur Trennung der Einlagerungsbereiche vom schachtnahen Bereich und zur Abdichtung von durchörterten Störzonen (Hauptanhydrit) sowie
- Schachtverschlüsse

Bei den Anforderungen an die Verschlussmaßnahmen ist zu unterscheiden zwischen denen, die in der Betriebsphase gelten und denen, die für die Nachbetriebsphase maßgeblich sind. Die wesentliche Anforderung an die geotechnischen Barrieren ist deren Fähigkeit, Bohrlöcher, Strecken, Einlagerungskammern und Schächte technisch dicht gegenüber im Störfall mögliche Zutritte von Wässern und salinaren Lösungen und evtl. gegenüber Gasen abzuschließen. Damit soll zum einen der Zutritt von Fluiden zu den eingelagerten Abfällen in den Bohrlöchern und Einlagerungsstrecken verhindert, aber auch die langfristig mögliche Ausbreitung von in Lösungen gegangenen Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen heraus in die noch nicht verfüllten Endlagerteile und an die Biosphäre verhindert oder verzögert werden.

Bohrlochverschlüsse

Für die Betriebsphase ist durch einen Verschluss der mit Abfällen befüllten Bohrlöcher der Begrenzung der Dosisleistung gemäß Strahlenschutzverordnung Rechnung zu tragen. In der Betriebsphase des Endlagers ist nicht auszuschließen, dass durch die Aufheizung des Bohrlochnahbereiches das Kristallwasser aus dem Salz in das Bohrloch freigesetzt wird. Hieraus können Korrosionsprozesse entstehen, die zur Bildung von Gasen (z. B. Wasserstoff) führen. Daraus leitet sich die Forderung nach

einer hohen Permeabilität in der Betriebsphase ab, um entstehende Gase durch die Bewetterung unschädlich abzuführen. In der Nachbetriebsphase sollte der Bohrlochverschluss dicht sein, und eine geringe Permeabilität besitzen, damit Störfallmedien (z. B. Lauge) nicht in die befüllten Bohrlöcher eindringen können.

Streckenverschlüsse

Streckenverschlüsse werden als Bauwerke betrachtet, die Teile des Endlagerbergwerkes (Einlagerungsbereiche, Störzonen) langfristig gegenüber im Störfall anstehende Fluide abdichten. Je nach Betrachtungszeitraum (Betriebsphase oder Nachbetriebsphase) sind entsprechende Anforderungen zu erfüllen.

- In der Betriebsphase des Endlagers resultieren die Anforderungen im wesentlichen aus der Errichtung des Verschlussbauwerkes.
 - Die Errichtung der Streckenverschlüsse muss so rechtzeitig in der Betriebsphase erfolgen, dass die Dichtwirkung mit Beginn der Nachbetriebsphase sichergestellt ist
 - Die Streckenverschlüsse sind im Rückbau herzustellen und so zu planen, dass sie unter den Bedingungen von nur einseitiger Zugänglichkeit hergestellt werden können (einfache Bauweise)
 - Die Streckenverschlüsse müssen in Form, Material und Aufbau so hergestellt werden, dass sie der Anforderung nach Dichtigkeit und Standsicherheit genügen
- Die maßgebliche Anforderung in der Nachbetriebsphase ist die Dichtigkeit der Streckenverschlüsse. Im einzelnen lassen sich folgende Anforderungen definieren:
 - Die Streckenverschlüsse müssen technisch dicht gegenüber Fluiden ausgelegt werden
 - Die zum Einsatz kommenden Materialien müssen beständig bleiben gegenüber korrosiven Salzlösungen und Gasen sowie gegenüber erhöhten Umgebungstemperaturen (bis 80 °C in der Nachbetriebsphase)
 - Die Streckenverschlüsse müssen standsicher ausgelegt sein gegenüber dem der Teufenlage entsprechenden Gebirgsdruck und den maximal möglichen Fluiddrücken (petrostatischer und hydrostatischer Druck)
 - Die Wirkungsprinzipien der einzelnen Bauteile sollen einfach, bekannt und erprobt sein
 - Das Gesamtsystem des Streckenverschlusses soll mit zunehmender Standzeit in einen immer sichereren (stabileren) Zustand hinsichtlich Standsicherheit und Dichtigkeit übergehen (positiv überkritisches Verhalten)

Schachtverschlüsse

Die beiden Schächte Gorleben 1 und 2 stellen die einzigen planmäßigen Verbindungen zwischen der Biosphäre und der Geosphäre, in der die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen, dar. Deshalb kommt dem sicheren Verschluss dieser Bauwerke besondere Bedeutung im Hinblick auf eine langzeitsichere Abdichtung zu. Diese Abdichtung muss in zwei Richtungen wirken. Zum einen soll verhindert werden, dass Wässer oder salinare Lösungen über den Schacht in das Endlagerbergwerk gelangen. Zum anderen soll auch ein Auspressen von langfristig in Lösung gegangenen Radionukliden durch den Schacht in die Biosphäre verhindert werden. Insofern decken sich die Anforderungen an langzeitsichere Schachtverschlüsse mit denen, die an die horizontalen Streckenverschlüsse gestellt wurden. Hinzu kommt noch die Forderung nach Wartungsfreiheit, da eine Nachbesserung eines Schachtverschlusses in der Nachbetriebsphase nicht mehr möglich ist. Bei Streckenverschlüssen ist dies zumindest in der Restbetriebszeit von der zum Schacht gerichteten Seite her möglich.

2.2.5.3 Verfüll- und Verschlusskonzept

Es ist vorgesehen, das bei der Streckenauffahrung gewonnene Haufwerk aus Salzgrus als Versatzmaterial zu verwenden. Untersuchungen im Rahmen von F+E-Vorhaben haben die grundsätzliche Eignung dieses Materials aufgezeigt /2-9/. Das Korngerüst eines aus Salzhaufwerk geschütteten Versatzkörpers wirkt mechanisch stabilisierend, indem es der Konvergenz einen mit der Zeit zunehmenden Widerstand leistet. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit zunehmender Kompaktion zu. Mit einem Porenanteil von anfänglich 35 % reduziert es von Beginn an das Aufnahmevermögen von Fluiden. Im Einlagerungsbetrieb dient es als Abschirmmaterial. Detaillierte Nachweise zu Erfüllung der einzelnen Anforderungen sind im Zuge der weiteren Planungen für das Endlager noch zu erbringen.

Die Verfüllung von verbliebenen Hohlräumen nach der Einlagerung von Abfallgebinden erfolgt unter folgenden Randbedingungen:

- Die Einlagerung erfolgt im Rückbau und beginnt an der äußeren Markscheide des Grubengebäudes im östlichen Teil des Salzstockes. Jeweils parallel zum Einlagerungsbetrieb werden die danach benötigten Einlagerungsstrecken aufgefahren. Das dabei anfallende Haufwerk steht als Versatzmaterial zum Verfüllen der bei der Einlagerung verbleibenden Hohlräume zur Verfügung. Für die Aufbereitung des Haufwerkes ist ein Bunker mit Brech- und Siebanlage unter Tage installiert.

Die für die Einlagerung benötigten Strecken und Bohrlöcher werden erst kurz vor Beginn der Nutzung aufgefahren und nach erfolgter Einlagerung wieder verfüllt und verschlossen. Dadurch wird die Offenhaltungszeit aller Hohlräume weitgehend minimiert.

- Die betrieblichen Abläufe im Endlager sehen Verkehrswege für den Transport von Gebinden einerseits und von Haufwerk andererseits sowie die Gliederung in mehrere Einlagerungsfelder vor. Die Einlagerungsfelder sind zwischen zwei Richtstrecken angeordnet. In der nördlichen Richtstrecke erfolgt gleisgebunden der Gebindettransport und der Haufwerkstransport zum Versetzten der Strecken. Der Haufwerkstransport aus der Streckenauffahrung wird in der südlichen Richtstrecke zum Bunker durchgeführt.
- Bei der Auswahl der Verfüllverfahren und Versatztechnik sind die Abmessungen der Strecken und Kammern und die Einlagerungstechniken zu berücksichtigen.

An die Verfülltechnik werden folgende Anforderungen gestellt:

- Erreichen einer hohen Anfangsdichte des Versatzes
- firstbündiger Einbau
- Hohlraumminimierung im Versatz zwischen oder seitlich der Behälter
- Gewährleistung der visuellen Kontrolle des Versatzfortschrittes
- hohe Flexibilität durch leichte Umsetz- und Handhabbarkeit der Geräte
- leistungsfähiger Versatzbetrieb (Durchführung eines Versatzzyklus innerhalb einer Schicht)
- geringe Störanfälligkeit - hohe Verfügbarkeit
- Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Bei der Auswahl der Verfülltechnik sind weiterhin zu beachten:

- Zu verfüllendes Volumen
- Länge der zu verfüllenden Abschnitte
- Transportmöglichkeiten (z. B. Nutzung vorhandener Gleise)
- Zeitlicher Ablauf der Einlagerung der Abfallgebinde in Abhängigkeit vom faktischen Mengengerüst der verschiedenen Gebindetypen

Ausgehend von den o. g. Anforderungen und Randbedingungen kommen für die Verfülltechniken der einzelnen Hohlräume im Einlagerungsbereich als auch in den übrigen Strecken und Kammern der Blasversatz, der Schleuderversatz und in größeren Strecken und Hohlräumen der Schüttversatz in Betracht. Da bei der Verfüllung der verbleibenden Hohlräume mit trockenem Salzgrus eine starke Staubentwicklung zu erwarten ist, sind Maßnahmen zur Einhaltung der Anforderungen des Arbeitsschutzes und zur Minimierung der Staubbelastung in den Abwettern zu ergreifen. Dazu gehört eine Entstaubungsanlage, über die die Abwetter bei Versatzbetrieb in Verbindung mit der saugenden Sonderbewetterung geführt werden.

2.2.5.4 Verschlusskonzept

Entsprechend den Anforderungen an die Verschlussbauwerke kommen folgende technischen Konzepte für die Bohrloch-, Strecken-, Schachtverschlüsse in Betracht. Im Rahmen weiterer Konzeptplanungen sollten Varianten dazu betrachtet und zugehörige Sicherheitsnachweise, insbesondere zur Standsicherheit und Dichtheit, für diese geotechnischen Barrieren geführt werden.

– Bohrlochverschlüsse

Das Einlagerungskonzept für HAW- und CSD-C-Kokillen sowie für Brennstabkokillen sieht deren Einlagerung in 300 m oder 30 m tiefen vertikalen oder geneigten Bohrlöchern vor. Aus strahlenschutztechnischen Gründen ist es während des Betriebes erforderlich, unmittelbar nach Einlagerung der letzten Kokille das Bohrloch zu verschließen. Danach kann die Bohrlochsleuse entfernt und auf das nächste Einlagerungsbohrloch umgesetzt werden.

Die eingelagerten, wärmeentwickelnden Abfälle verursachen nach /2-10/, dass langfristig geringe Mengen von Kristallwasser aus dem Salzgestein in Richtung Bohrloch fließen, wodurch Korrosionsprozesse und letztendlich Gasentwicklungen möglich werden. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, ein Verschlussmaterial zu wählen, das anfänglich permeabel genug ist, Gase schadlos über die Grubenwetter abzuführen. Langfristig sollte das Material die Permeabilität des umgebenden Steinsalzes erreichen. Deshalb wird vorgesehen, ausschließlich Salzgrus als Bohrlochverschlussmaterial zu verwenden. Die Anfangspermeabilität hierfür liegt bei ca. 10^{-12} m^2 . Durch die thermisch induzierte beschleunigte Konvergenz im Bohrloch verringert sich die Permeabilität langfristig auf ca. 10^{-21} bis 10^{-22} m^2 . In /2-10/ wurden diese Phänomene wissenschaftlich untersucht. Im Rahmen weiterer Planungen kann der Einsatz alternativer Materialien geprüft werden. Dabei hat Salzgrus als natürliches und unter Tage im Zuge der Hohlraumerstellung anfallendes Material von vornherein wirtschaftliche Vorteile, die mit zu berücksichtigen sind.

Etwa 10 m unterhalb der Sohle der Einlagerungsstrecke soll das Bohrlochverschlussmaterial auf die zuletzt eingelagerte Kokille aufgesetzt werden. Die Befüllung des Bohrloches erfolgt zunächst durch die Bohrlochsleuse und nach deren Entfernung direkt in das Bohrloch. Der Ringraum zwischen eingelagerter Kokille sollte dabei ebenfalls mit Salzgrus befüllt werden. Im Rahmen detaillierter Planungen können auch hier alternative Materialien auf ihre Eignung geprüft werden.

– Streckenverschlüsse

Aus den Anforderungen an die geotechnischen Barrieren lässt sich erkennen, dass die Verschlüsse der Hauptförderstrecken (Richtstrecken Nord und Süd) planmäßig erforder-

liche Abdichtbauwerke sind, die im Störfall in der Nachbetriebsphase den Zutritt von Wässern und salinaren Lösungen zu den Abfällen verhindern, zumindest aber verzögern. Da die Wirksamkeit dieser Verschlüsse, die während der Betriebszeit des Endlagers errichtet werden, in der Nachbetriebsphase für einen Zeitraum bis ca. 10.000 Jahren gefordert wird, kommen nur Materialien in Frage, deren Langzeitbeständigkeit aus Vorkommen in der Natur bekannt sind. Dazu zählen nach Sitz /2-11/ Naturwerksteine (z. B. Basalt, Granit, Salzblöcke), Zuschlagstoffe (z. B. Kies, Sand, Schotter), Bitumen/Asphalt, Beton oder Bentonit und Tone.

Im Rahmen weitergehender Planungen ist zu untersuchen, für welche dieser Materialien hinreichend viele reproduzierbare Kenngrößen aus Reihenuntersuchungen vorliegen und in welchem Umfang weitere Versuche und Entwicklungsarbeiten erforderlich sind, um die erforderliche Datenbasis für langzeitbeständige Materialien im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens vorlegen zu können.

Entsprechend den Anforderungen muss der Streckenverschluss sowohl in der Lage sein, Lasten sicher abzutragen als auch langfristig den Streckenquerschnitt abzudichten. Die Lastabtragung kann durch entsprechend gestaltete Widerlager erfolgen, die Dichtwirkung durch Verfüllung des Streckenquerschnittes mit laugeresistentem und -undurchlässigem Material. Das Bauwerk muss zweiseitig beanspruchbar sein, da ein Zutritt des Störfallmediums vom offenen Bereich des Grubengebäudes oder Einlagerungsbereich möglich ist. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Bauwerkes besteht aus einem zentralen statischen prismatoidförmigen Widerlager aus Beton und beidseitigen Dichtelementen aus Asphalt bzw. Bitumen. Die Dimensionierung der Bauteilgrößen erfolgt durch geomechanische Auslegungsberechnungen und Standsicherheitsnachweise im Rahmen vertiefender Planungen. Zur Überprüfung der Wirkungsprinzipien sind Untersuchungen im Labor und in situ erforderlich.

Vor der Herstellung des Verschlussbauwerkes ist im Detail der Standort zu untersuchen und je nach Offenstandzeit der Strecke eine bergmännisch schonende Querschnittserweiterung zur Entfernung möglicher Auflockerungsbereiche vorzusehen. Die Lage der Verschlussbauwerke innerhalb des Grubengebäudes muss aus den standortspezifischen Anforderungen hergeleitet werden. Planerisch sind vor und hinter einer potentiellen Störungszone (Anhydrit) Verschlussbauwerke zu berücksichtigen. Weitere Verschlussbauwerke sind zum Abschluss der Einlagerungsfelder gegenüber möglichen Lösungszutritten im schachtnahen Bereich vorzusehen. Nach weiteren Detailuntersuchungen im Rahmen der Erkundung des Salzstockes sowie der Endlagerauslegung können die Standorte der Verschlussbauwerke präzisiert werden.

– Schachtverfüllung und -verschluss

Im Rahmen der Stilllegung des Endlagerbergwerkes sind die Verfüllung und der Verschluss der beiden Schächte die abschließenden Maßnahmen, die sowohl nach Bun-

desberggesetz als auch gemäß den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gefordert werden. Damit soll erreicht werden, dass dauerhaft weder allgemein-schädliche Einwirkungen auftreten noch die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Grenzwerte für die Nachbetriebsphase eines Endlagers überschritten werden.

Bei der betrachteten Betriebszeit des Endlagers bis zum Jahr 2080 werden die Schächte zum Zeitpunkt des Stilllegungsbeginns ca. 90 Jahre alt sein. Es wird davon ausgegangen, dass durch regelmäßige Inspektion und Wartung sichergestellt wird, dass keine zusätzlichen Ausbaumaßnahmen erforderlich werden, sondern dichte Schachtröhren bis zur Teufe von ca. 340 m vorhanden sind. Die Gesamtteufe beider Schächte wird mit 1.000 m angenommen, da über das endgültige Einlagerungskonzept noch nicht entschieden werden kann.

Bevor mit der Verfüllung der Schachtröhren begonnen wird, sind die technischen Einrichtungen und Ausrüstungen im gesamten Infrastrukturbereich und in den Schächten selbst zurückzubauen und zu entfernen. Dazu zählen der Abtransport aller Fahrzeuge und sonstiger Maschinen sowie aller Materialien und Einrichtungen in den Werkstätten und Lagern. Sämtliche Medienver- und -entsorgungseinrichtungen sind rückzubauen und abzutransportieren, soweit sie nicht mehr während der Schachtverfüll- und -verschleißarbeiten benötigt werden. Schließlich sind auch alle Schachteinbauten und -fördereinrichtungen zurückzubauen, so dass freie Schachtröhren mit einem lichten Durchmesser von 7,5 m verbleiben. Es wird davon ausgegangen, dass die Füllörter bis unmittelbar an den Schacht mit Salzgrus verfüllt sind und ggf. gegenüber dem Schacht abgeschlossen sind.

Auf Basis der vorher beschriebenen Anforderungen wird folgendes Grundkonzept gewählt. Die Schachtröhren im Salinar werden bis 50 m unterhalb der Schachtfundamente mit Schotter verfüllt, um eine setzungsarme Verfüllsäule zu erhalten. In einer vertiefender Planung ist zu untersuchen, ob andere Materialien (z. B. Salzgrus) dafür ebenfalls geeignet sind, langfristig die Schachtröhre zu stabilisieren und gleichzeitig geringes Setzungsverhalten zu zeigen. Auf die Verfüllsäule wird der Schachtverschluss aufgesetzt. Dieser besteht aus einem statischen Widerlager und je einer Asphaltichtung unter- und oberhalb dieses Tragelementes. Auf das statische Widerlager kann gegebenenfalls verzichtet werden, wenn der Nachweis erbracht wird, dass die Dichtung vollständig in ihrer Funktion erhalten bleibt bei zu erwartenden Setzungen der Verfüllsäule.

Die verbleibenden etwa 400 m langen Schachtröhren bis zur Tagesoberfläche werden ebenfalls mit Schotter verfüllt, um die Schachtröhre zu stabilisieren. Der Abschluss dieser Maßnahme bildet der Einbau eines Schachtdeckels.

Im Rahmen detaillierter Planungen ist zu prüfen, ob ein Kontrollraum zwischen Schachtdeckel und Oberkante Verfüllsäule erforderlich ist zur Überwachung des Setzungsverhaltens der Schachtsäule.

2.3 Endlagerflächenbedarf bei der „Aktualisierung des Konzepts Endlager Gorleben“

Ausgehend vom aufgestellten Mengengerüst, den Randbedingungen für Abbrand und Zwischenlagerzeit der wärmeentwickelnden Abfälle sowie den Einlagerungskonzepten lassen sich Abschätzungen zur erforderlichen Größe des Grubengebäudes durchführen.

Vor Abschluss einer untertägigen Erkundung können nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge und -abstand sowie der Behälterzwischenraum aufgrund der geologischen Verhältnisse vorgegeben werden. Der Sicherheitspfeiler zur nördlichen und zur südlichen Richtstrecke muss doppelte Richtstreckenbreite aufweisen. Die Größe und Ausrichtung der Felder muss sich dem wechselnden Schichtstreichen und den unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten anpassen.

Durch Temperaturfeldberechnungen für die betrachteten Einlagerungskonzepte wurde die folgende beispielhafte Aufteilung der Felder ermittelt (s. Abbildung 2-8). Die Fläche der nutzbaren Einlagerungsfelder umfasst 855.000 m².

Im Konzept Bohrlochlagerung von HAW- und CSD-C-Kokillen in 300 m tiefen Bohrlöchern sowie Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (Variante 1) sind die Felder WA 1 und Teile von WA 2 für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen vorgesehen. Dort reichen die Einlagerungsbohrlöcher von der Beschickungssohle (Teufe 870 m) bis zu einer Teufe von ca. 1.200 m. Bei Zugrundelegung der Referenz-Zwischenlagerzeit von 30 Jahren können im nordöstlichen Teil des Salzstock auf der Basis des von der BGR entwickelten Arbeitsmodells Gorleben (erwartete geologische Struktur) ca. 70 % der anfallenden POLLUX-8-Behälter bei einer durchschnittlichen Einlagerung von 234 Behältern pro Feld untergebracht werden. Die verbleibenden 30 % an POLLUX-8-Behältern könnten in einer 2. Sohle ca. 150 m unterhalb der 870 m-Sohle eingelagert werden. Falls im Rahmen der untertägigen Erkundung mehr geeignete Endlagerfläche identifiziert wird, können alle Endlagergebinde auf einer Sohle untergebracht werden.

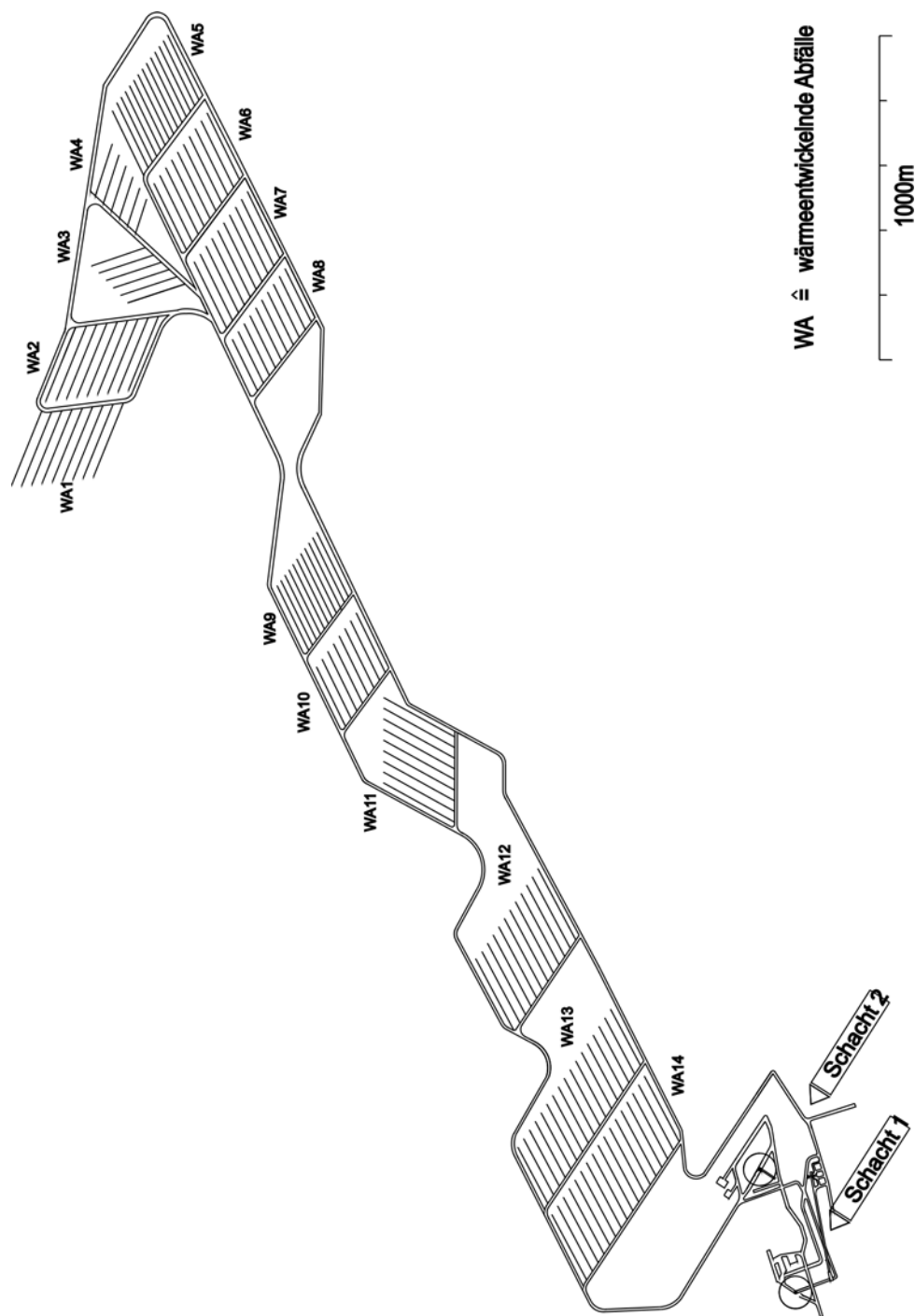


Abbildung 2-8: Felddaufteilung für wärmeentwickelnde Abfälle

3 Endlagerkonzept im Wirtsgestein Ton

Im folgenden Kapitel wird ein Konzept zur Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen im Wirtsgestein Ton beschrieben. Randbedingungen und Annahmen dafür werden vorangestellt, praktische Erfahrungen mit Bergbau in Ton in Deutschland dargestellt und Ergebnisse von Auslegungsberechnungen gezeigt.

Nach den Empfehlungen des Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd) /3-1/ zum Endlagermedium Ton soll die Teufe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ≥ 300 m liegen und deren Mächtigkeit ≥ 100 m sein. Nach einem Zwischenbericht der BGR /3-2/ sind dafür in Deutschland geeignete Tonformationen in der Unterkreide, im Dogger und im Lias zu finden.

Als Datenbasis für die Berechnungen zur thermischen Auslegung der Endlagerkonzepte wurden folgende Annahmen festgelegt:

- Teufe der vorgesehenen Einlagerungssohle: 500 m
- Daten zum Ton: Übernahme der Daten vom Unterlagelabor in Bure (Frankreich)

Die Teufe der Einlagerungssohle von 500 m wurde aus Vergleichbarkeitsgründen mit international vorgesehenen Konzepten gewählt. Die Daten zu den Materialeigenschaften des Tons wurden vom Untertagelabor Bure übernommen. Zum Bearbeitungszeitpunkt dieses Vorhabens standen Daten von deutschen Standorten noch nicht in vergleichbarer Qualität zur Verfügung.

Vor dem Hintergrund einer möglichst hohen Ausnutzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wurde für HAW- und BSK-Kokillen eine Bohrlochlagerung vorgesehen. Bei einer Formationsmindestmächtigkeit von 100 m wurde als nutzbare Bohrlochlänge ca. 55 m ermittelt unter Berücksichtigung von vorläufigen Sicherheitsabständen zur Formationsgrenze, nicht nutzbarer Bohrlochlänge, Bohrlochstopfen und der Höhe der Überfahrungsstrecken. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen zu den Sicherheitsabständen und den Ergebnissen aus technischen Planungen ist diese Annahme später zu verifizieren bzw. anzupassen.

Für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente ist die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern vorgesehen. Alternativ dazu wurde das Verbringen von Brennstäben in sogenannten Brennstabkokillen in Bohrlöchern untersucht mit der Zielrichtung einer optimalen Ausnutzung des verfügbaren Wirtsgesteins.

Das technische Endlagerkonzept wird im Folgenden unter Berücksichtigung und Beschreibung der möglichen Tonformationen, der Kenntnisse zur Streckenauffahrung und Bohrlocherstellung in Ton, der Ergebnisse der thermischen Auslegungsberechnungen

zur erforderlichen Feldgröße für POLLUX-Behälter (alternativ Brennstabkokillen) und HAW-Kokillen sowie einer Bewertung der Ergebnisse dargestellt.

3.1 Bergmännische Erfahrungen in Ton

Der Kenntnisstand über bergmännische Erfahrungen zum möglichen Endlagermedium Ton in Deutschland wird nachfolgend beschrieben. Hierzu wurden im Tiefbau bzw. Stollenbergbau betriebene Werke betrachtet und Angaben hinsichtlich:

- Aus- und Vorrichtung
- Grubenausbau
- Gewinnungsarbeiten
- Fördertechnik
- Wettertechnik
- Belegschaft
- Geologie
- Kenndaten des gewonnenen Tones

zusammengestellt /3-3/.

Untersucht wurden durch Befahrung die noch in Produktion stehenden Tiefbaue

- Grube Lengemann und Grube Goebelwerk in Großalmerode, Hessen
- Grube Seilitz in Meißen, Sachsen

und durch Recherche

- der Tonbergbau in der Grube Klingenberg in Klingenberg am Main sowie allgemein
- der Tonbergbau im Westerwald und in Rheinland-Pfalz /3-4/.

Abschließend wurden die Erfahrungen aus dem Betrieb der Schachtanlage KONRAD in Salzgitter untersucht und zusammengetragen. Dort wurden ebenfalls Hohlräume in Tongesteinsformation erstellt und ausgebaut.

3.1.1 Streckenauffahrung und -ausbau in Tiefbauen mit 15 - 80 m Teufe

Die untersuchten Gruben liegen in Teufen zwischen 15 und 80 m. Die Hauptstrecken wurden in vielfältiger Weise ausgebaut. Der Ausbau erfolgte trotz der für Bergbau geringen Teufen und durchschnittlicher Streckendurchmesser von 2,5 m in unterschiedlicher Form. In der Grube Lengemann (Teufe 80 m) kamen dazu z. B. folgende Stützkonstruktionen zum Einsatz:

- Ausmauerung,
- Betonformsteinausbau,
- vierteiligen nachgiebigen Stahlbogenausbau in Ringschluss mit 90 cm Bauabstand und Verzugsblechen in der Firste (siehe Abbildung 3-1) und
- Türstockausbau mit Holzschwartenverzug bei 4 m Streckenbreite und 3 m Höhe.



Abbildung 3-1: Hauptstrecke Grube Lengemann mit vierteiligen, nachgiebigen Stahlbogenausbau im Ringschluss

Der Tonabbau geschieht in der Grube Lengemann noch heute aus den Vorrichtungs- und Abbaustrecken heraus als ein- oder zweiflügliger Streifenbruchbau. Die Tongewinnung erfolgt mit einer Vettterschen Tonbohrmaschine auf Raupenfahrwerk mit 50 cm Vorschub pro Abbauscheibe. Zum Zerkleinern großer Tonbrocken dienen Druckluftpörmmer mit Tonspaten. Das geschnittene Haufwerk wird mit einem Ladewagen (Volumen ca. 0,5 m³) auf einen 350 m langen Gurtförderer (350 mm Breite) geladen. Die weitere Förderung erfolgt über kleine Förderwagen (Seilzuganlage) und eine weitere Bandanlage in einem Schrägstollen bis in die Fabrik.

In der ehemaligen Grube Richard (Westerwald) erfolgte der Abbau von Ton mit einem Fräslader und der Transport mit Kipploren (1 t Nutzlast) und Lokomotiven mit batterieelektrischem Antrieb.

Im Tontiefbau Abendtal (Teufe 68 m) werden die langlebigen Strecken (ca. 4,4 m² Querschnitt) mit Betonformsteinen und die Abbaustrecken mit Holz ausgebaut. Streckenkreuze und -abzweige werden in Beton oder Stahlausbau erstellt /3-1/, /3-5/.

Die Kosten für die Auffahrung werden mit durchschnittlich ca. 3.200 €/m und die Kosten für die Streckenunterhaltung mit ca. 1.100 €/m angegeben.

3.1.2 Streckenauffahrung und -ausbau in tonigen Gesteinsformationen der Schachanlage Konrad

Auf der Schachanlage KONRAD wurden 1990 zu wissenschaftlichen Untersuchungszwecken zwei je etwa 40 m lange Strecken im Tongestein aufgefahren. In diesen Strecken wurde ein Untersuchungsprogramm durchgeführt, das dem Nachweis der Dichtigkeit von alten Bohrungen und den später zu verschließenden Schächten im Bereich der Barrierschichten eines Endlagers diente. Diese Strecken wurden 1999/2000 wieder verfüllt.

Die Strecken wurden in einer Teufe von 343 m (Mittleres Alb) bzw. 541 m (Mittleres Barrême) aufgefahren, und zwar durchgehend in Gesteinen der Unterkreide. Diese bestehen aus einem dunkel- bis schwarzgrauen Tonstein, der im Mittleren Alb bituminös, in Teilbereichen schwach feinsandig und stark wasserempfindlich ist. Im Mittleren Barrême ist der Tonstein stark schluffsandig bis mergelig ausgebildet und hat einen stark schwankenden Kalkgehalt.

Die Strecken wurden händisch mit dem Abbauhammer hergestellt, und zwar in einem Streckenquerschnitt von ca. 10 m² auf den ersten 20 m Streckenlänge und ca. 7,5 m² im hinteren Streckenbereich. Wegen der schwierigen Gebirgsverhältnisse erhielten die Strecken im Rahmen der Sofortsicherung einen Ankerausbau (Ankerdichte = 1 Anker pro m²) mit Baustahlmattenverzug (Q 188).

Im First- und Ulmenbereich (Übergang zwischen First und Stoß) der Strecke in 343 m Teufe wurde als endgültiger Ausbau ein Anker-Spritzbetonausbau (Güte B25) mit ca. 15 cm Betondicke eingebracht. Die Stöße wurden teilweise mit Spritzbeton konsolidiert (s. Abbildung 3-2).

Die Strecke in 541 m Teufe (s. Abbildung 3-3) wurde auf der gesamten Länge mit geschraubten Stahlbögen (Bauabstand = 0,5 m) starr ausgebaut; zusätzlich wurden die Firste und der Übergang zwischen Firste und Stoß durchgehend mit einer ca. 15 cm dicken Spritzbetonschicht (Güte B25) gesichert.

Als Sohle wurde zur Stabilisierung des Grubenraumes eine durchgehende, mit Bau-
stahlmatten armierte Betonplatte von etwa 20 cm Dicke eingebracht.



Abbildung 3-2: Schachanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe –
343 m) mit Anker-/ Spritzbetonausbau

Nach ungefähr 10 Jahren Standzeit zeigten sich in der Strecke in 343 m Teufe an den
Stößen Konvergenzen, im Bereich der Sohle Risse infolge von Sohlenhebungen.

Auch in der Strecke in 541 m Teufe waren im Stoßbereich deutliche Konvergenzen
erkennbar. Die Stöße waren aufgelockert und in die Strecke hereingedrückt. Die Be-
tonsohle war zum Teil aufgebrochen und bis zu 50 cm angehoben /3-6/.



Abbildung 3-3: Schachanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe – 541 m) mit geschraubten Stahlbögen und Anker-/Spritzbetonausbau in der Firste

Für die Schachanlage Konrad liegen weitere Erfahrungen bei der Herstellung von Strecken in sehr wasserempfindlichen Tongesteinen des Doggers in ca. 1.000 m Teufe vor. Die Strecken wurden mit einer kleinen Teilschnittmaschine aufgeföhren und haben einen Querschnitt von ca. 20 bis 30 m². Aufgrund der Gebirgsverhältnisse wurde ein Ausbau aus einer zweischaligen, armierten Spritzbetonschicht mit Sohlenschluss in der Güte B25 erstellt. Zusätzlich wurde hier der Gebirgsverband verstärkt durch Injektionsmaßnahmen mit einem 2-Komponenten-Kunstharzsystem und Injektionsankern unterschiedlicher Länge (s. Abbildung 3-4).



Abbildung 3-4: Zweischaliger, bewehrter und wasserundurchlässiger Spritzbetonausbau im Dogger in ca. 1000 m Teufe

Nach rund 8 Jahren Standzeit sind am Ausbau keinerlei Verformungen und Risse infolge von Konvergenzen erkennbar.

Die Auffahrungs-, Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen von Grubenräumen im wasserempfindlichen Tongestein waren kosten- und zeitaufwändig. Eine konkrete Ausweisung einer Schicht- oder Auffahrungsleistung und deren Kosten sind für einen Planungsansatz aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen in den Tonsedimenten nicht oder nur eingeschränkt möglich. Tatsache ist, dass die Kosten für den Sicherungs- und Ausbauaufwand deutlich höher sind als im standfesten und wasserunempfindlichen Gebirge. Die Herstellungskosten von Grubenräumen im Tongestein auf der Schachanlage KONRAD belaufen sich je aufgefahrenen Meter auf ca. 7.000 € bei kleinen Querschnitten (ca. 10 m²) und auf 20.000 bis 30.000 € bei größeren Querschnitten (ca. 30 m²).

3.1.3 Bohren in Ton

Um die Erstellbarkeit von Einlagerungsbohrlöchern in Ton zu überprüfen, war die Übertragbarkeit gängiger Bohrverfahren von über Tage auf unter Tage zu untersuchen. Einsatzbestimmend sind unter anderem die Eigenschaften des als Wirtsformation ausgewählten Tons. Hier sind für das Bohrloch besonders zu nennen Gesteinsfestigkeit, Konvergenz, Fließverhalten des Tons und evtl. Präsenz von Restwasser. Nach dem Bohren kommt es im Gebirge zu Entspannungen, die wiederum das Bohrloch deformieren. Dem entgegen wirkt z. B. eine Stabilisierung der Bohrung durch Einsatz eines GFK-Rohres für die Zeit zwischen Bohrlocherstellung und -vorbereitung sowie dem tatsächlichen Einbringen des Gebindes. Das Bohrgerät benötigt für Tongestein keine besonders große Vorschubkraft, aber eine sehr hohe Zugkraft, um den Bohrkopf und den Gestängestrag im Notfall aus dem Bohrloch herausziehen zu können. Für die Bohrarbeiten ist ein Trockenbohrverfahren oder ein Verfahren, das Formationswässer benutzt, zu wählen, da das Einbringen von anderen Wässern als Spülung zu unkontrollierbaren Quellerscheinungen des Tons führen kann.

3.1.3.1 Erbohrung von Kernen in Ton

Voraussichtlich sind Kerne zur Überprüfung der Geologie des Bohrloches zu ziehen. Die Wahl des Kernbohrverfahrens wird bestimmt durch die Konsistenz der zu erbohrenden Tonformation. Erkunden und Aufbohren sollen möglichst mit einem Bohrgerät durchgeführt werden. Die zu erstellende Einlagerungsbohrung wird in mehreren Schritten aufgefahren. Die Vorgehensweise wird ebenfalls durch die Konsistenz der Tonformation bestimmt. Ist, bedingt durch die Konsistenz des zu erbohrenden Materials, eine kontinuierliche Kernbohrung nicht möglich, ist die Bohrung diskontinuierlich zu Kernen (siehe Varianten 1 und 2).

Ist die Tonformation standfest, d. h. handelt es sich um Tongestein, ist die Möglichkeit der Durchführung einer kontinuierlichen Kernbohrung bis zur Endteufe gegeben, wie in Variante 3a und 3b beschrieben wird.

Variante 1: Erstellen eines Vorbohrloches mittels Hohlbohrschnecke inkl. einer Kernbohrung

Die Bohrungen werden im Drehbohrverfahren mit kontinuierlicher Förderung mittels einer Endloshohlbohrschnecke erstellt. Die Gestänge (Schneckensegmente) besitzen eine Länge von 1,00 m - 2,00 m und werden so lange nachgesetzt, bis die gewünschte Teufe der Bohrung erreicht ist. Der entscheidende Unterschied gegenüber dem Endlosschneckenbohren ist ein durchgehendes Hohlgestänge. Im Hohlgestänge befindet sich an einem separaten Gestänge ein Zentralbohrer. Dieser ist mit dem Schneckenrohr während des Bohrens verbunden. Soll eine Bodenprobe entnommen werden, wird

das Gestänge mit dem zentralen Bohrwerkzeug entfernt und eine Vorrichtung zur Entnahme von Bodenproben, z. B.: ein Kernbohrstrang, installiert. Das heißt, dass je nach Beschaffenheit der Tonformation voreilend oder sukzessive Bodenproben in Form von Kernen entnommen werden können.

Variante 2: Erstellen einer Kernbohrung mit einem Rammbohrhammer

Der Rammbohrhammer ist ein bewährtes Gerät zur Entnahme ungestörter Bodenproben bei dem Einsatz mechanischer Trockenbohrverfahren. Der am Seil hängende Drucklufthammer treibt eine mit ihm an seinem unteren Ende verbundene Ramm- schappe in das Erdreich ein und bringt beim Herausziehen die eingeschlagene Boden- probe vollständig heraus. Das Bohrloch wird in seiner ganzen Länge gekernt und zwar nach einer Methode, die es gestattet die dünnsten Einlagerungen sicher zu erkennen. Die erreichbaren Bohrtiefen betragen bis ca. 80 m je nach Beschaffenheit der Tonfor- mation und Bohrdurchmesser.

Variante 3a: Erstellen einer Kernbohrung im Drehbohrverfahren (Doppelkernrohr - Rotarybohren mit Formationswasser)

Handelt es sich bei der Tonformation um ein standfestes Material, d. h. Tongestein, wie es z. B. auf der Schachanlage Konrad vorgefunden wird, besteht die Möglichkeit eine Vorerkundung der Einlagerungsbohrung mit einem Drehbohrverfahren durchzuführen. Die Probenentnahme erfolgt mit einem Doppelkernrohrsystem. Dieses Doppelkernrohr besteht aus zwei ineinander liegenden Rohren, welche über ein Lager mit einander verbunden sind. Hierbei schützt das Innenrohr die Probe, welche mit zunehmender Teufe in dieses hineinwandert. Der Bohrprozess wird durch die Rotation des Kernroh- res über den Bohrstrang ausgeübt. Als Bohrwerkzeug befindet sich am unteren Ende des Kernrohres eine Kernbohrkrone. Diese ist auf die zu bohrende Tonformation anzu- passen. Um die Vorerkundung der Einlagerungsbohrungen zu beschleunigen, kann für diesen Zweck ein Doppelseilkernrohr verwendet werden.

Die Seilkernrohre entsprechen der vorher erwähnten Konstruktion des Doppelkernroh- res mit gelagertem Innenrohr. Jedoch ist bei dem Seilkernrohr die gesamte Innen- rohreinheit im Außenrohr ver- und entriegelbar und am Seil mit Hilfe eines Kernrohr- fängers (Overshots) ausbaubar, während das Gestänge im Bohrloch verbleibt.

Um eine höhere Qualität der zu erbringenden Proben zu gewährleisten, ist der Einsatz eines sogenannten Plastik-, Fiberglas- oder PVC-Liner erforderlich. Dieser wird in das Innenrohr eingelassen. Ist die Kernstrecke abgebohrt, wird dieser Liner mit samt dem darin befindlichen Kern entnommen. Somit ist die Bodenprobe während des Bohrvor- ganges und der Probenentnahme zusätzlich geschützt.

Dieses hier beschriebene Kernsystem funktioniert nur in Verbindung mit einem Spül- medium, welches den Austrag des Bohrklein bewirkt. Dies ist möglich mit einer Flüs-

sigkeit oder Luft. Auf dem Bergwerk Konrad wurden in der Vergangenheit Spülbohrungen im Ton mit Formationswasser durchgeführt. Diese Wässer sind NaCl gesättigt und bewirken somit in der spezifischen Tonformation keine nennenswerten Quellerscheinungen.

In diesem Falle wird wie bei bergbauüblichen Bohrungen zu dem Bohrgerät ein Spültank und eine bergbauübliche Spülpumpe installiert, um den Spülkreislauf über die Bohrung herzustellen.

Variante 3b: Erstellen einer Kernbohrung im Drehbohrverfahren (Doppelkernrohr – Rotarybohren mit Luft)

Für den Betrieb mit dem Spülmedium Luft sind geringfügige Änderungen am Kernsystem erforderlich. Ein solches System wurde für die Erkundung des Salzstockes Gorleben verwendet.

Im Gegensatz zum Kernsystem, welches mit Flüssigkeiten betrieben wird, haben die Stabilisatoren, Bohrkrone und das Innenrohr ein anderes Design und geänderte Abmaße. Beim Betrieb mit Luft wird keine Tankanlage und Spülpumpe benötigt. Betrieben wird dieses System mit einem Kompressor, der ca. 10 m³/min bei 10 bar Luft fördert und eine Aufstiegsgeschwindigkeit von min. 17 m/sec im Ringraum gewährleistet. Vorteilhaft ist, dass das Equipment zur Spülluftaufbereitung und -behandlung nicht im Bereich des Bohrgerätes aufgestellt sein muss.

Wird beim Niederbringen der Bohrung Formationswasser oder Feuchte angetroffen, ist der Betrieb mit dem Spülmedium Luft nicht vorteilhaft, da der Austrag des Bohrklein stark beeinträchtigt wird.

Bei den Varianten 3a und 3b wird die Vorbohrhohlschnecke als Standrohr genutzt.

3.1.3.2 Aufweiten der Bohrung auf Endquerschnitt

Ist die Erkundung der zu erstellenden Einlagerungsbohrung abgeschlossen, wird diese im Trockenbohrverfahren auf den gewünschten Querschnitt erweitert. Dies geschieht ebenfalls mit Hilfe der Schneckenbohrtechnik. Bedingt durch das eingesetzte Vorerkundungskernbohrverfahren sind die Bohrungen von einem max. Ø 280 mm auf den Endquerschnitt zu erweitern.

Variante 1: Aufbohren mittels Hohlbohrschneckentechnik

Bei diesem Verfahren wird kontinuierlich die Bohrung erweitert. Die Hohlbohrschnecke ist hierbei mit einem Piloten oder einem Zentralbohrer ausgestattet. Der Pilot würde zusätzlich den Strang im schon bestehendem Vorbohrloch führen. Bei diesem Verfahren wird das Bohrklein über die Schnecke kontinuierlich ausgetragen. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass in einem Erweiterungsschritt von Bohrlochmund bis zur Endteufe kontinuierlich gebohrt werden kann. Es ist hierbei abhängig von der Konsistenz der Tonformation, ob in zwei oder drei Erweiterungsschritten der Endquerschnitt erreicht werden kann. Da über die gesamte Bohrlochlänge gebohrt wird, treten relativ hohe Drehmomente auf.

Variante 2: Aufbohren mittels konventioneller Schnecke

Mit dem Einsatz einer konventionellen Schnecke wird das erforderliche Drehmoment reduziert. Hierbei handelt es sich nicht um ein kontinuierliches Bohren. Bei diesem Dreh und Aushubverfahren wird die Schnecke über ihre Länge in die Formation gedreht und anschließend gezogen. Diese Art Schnecke wird hauptsächlich im Spezialtiefbau eingesetzt. Die mit einem bergbauüblichen Gestänge angetriebene Schnecke würde eine max. Länge von ca. 2,00 m und den aufzubohrenden Enddurchmesser (ca. 1,10 m in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des Endlagergebundes - s. Kap. 3.2.2.4) haben.

3.1.3.3 Einbringen einer GFK – Schutzverrohrung

Als Schutzverrohrung zur Stabilisierung des Bohrloches bis zur Einlagerung von Gebinden werden Fieberglassrohre in einem Querschnitt von ca. 1,10 m und Einbaulängen von 4,00 m eingesetzt. Der Einsatz von GFK-Rohren hat folgende Vorteile gegenüber Stahlrohren:

- GFK- Rohre können mittels Rollenmeißel in kürzerer Zeit zerbohrt werden. Die Späne der zerbohrten Rohre fallen auf die Sohle und werden mittels Greifer (z. B. Abteufbirne, Leffer Seilgreifer), wie er im konventionellem Schachtbau verwandt wird, geborgen
- Die Handhabung mit GFK Rohren ist leichter, bedingt durch deren geringes Eigengewicht und der damit verbundenen einfacheren Logistik
- GFK- Rohre sind hinsichtlich radialer Belastungen eine Alternative zu Stahlrohren in der Tiefbohrtechnik, da sie ebenfalls den API- Spezifikationen entsprechen.

Das Bergen von Stahlrohren ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Besteht eine Gebirgsanbindung durch Konvergenz, Quellen, usw. über einen größeren Teufenbereich, können sie unter Beibehaltung des Bohrungsdurchmessers nur durch Zerfräsen geborgen werden. Dies stellt einen höheren zeitlichen und materiellen Aufwand dar; zumal das Problem der Kühlung des Fräswerkzeuges beim Fräsen oder Schneiden im Trockenbau nicht gelöst ist. Bei bestehendem Ex-Schutz sind diese Arbeiten ohne das Einbringen von Flüssigkeiten nicht durchführbar.

3.1.3.4 Bohrgerät

In der Abbildung 3-5 wird eine Vertikalbohranlage mit kurzen Mastlängen eines deutschen Bohranlagenherstellers dargestellt. Im Anwendungsfall unter Tage wird mit Gestänge gearbeitet. Das Bohrgerät hat eine Höhe von ca. 7,00 m sowie die Breite des Gleises und ist auf dem Schienenstrang verfahrbar. In der Position über einer Bohrung wird es einerseits mit einer Klemme am Schienenstrang und andererseits über Abstützzylinder, die gleichzeitig Zuglast des Gerätes aufnehmen können, fixiert.

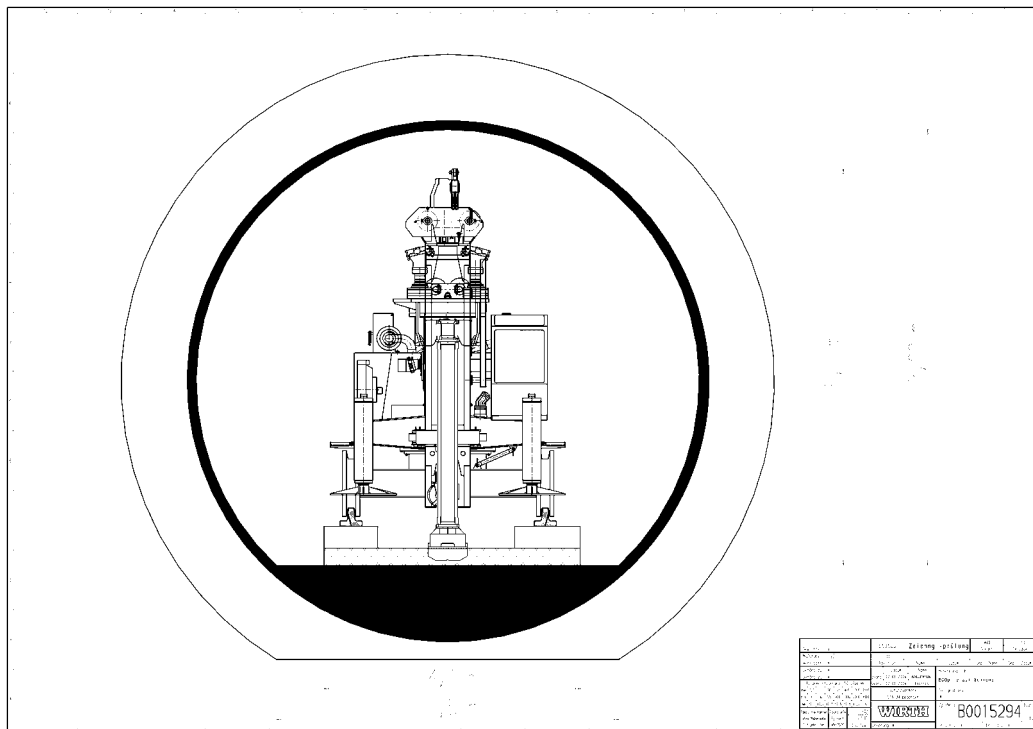


Abbildung 3-5: Erstellung der Bohrlöcher in der Bohrlochbeschickungsstrecke

3.1.4 Auswertung der bergmännischen Erfahrungen in Ton

Es hat sich gezeigt, dass in Deutschland nur noch wenige Tiefbaue, in denen in Teufen zwischen ca. 15 bis 80 m Ton für industrielle Zwecke abgebaut und gefördert wird, existieren. Erfahrungen aus diesem Bereich können nur bedingt auf ein Endlager im Wirtsgestein Ton übertragen werden. Zu erkennen ist aber, dass ein hochwertiger Ausbau in Bereichen, die für eine längere Nutzung vorgesehen sind, erforderlich ist. Grundsätzlich ist Tongestein vor Feuchtigkeitseinwirkungen zu schützen. Erfahrungen über das Auffahren und die Unterhaltung von Strecken im Tongestein in Teufen zwischen 340 m und gut 1.000 m liegen hingegen auf der Schachtanlage KONRAD vor.

Für die Herstellung von Strecken im Tongestein in großen Teufen zwischen 500 und 1.500 m wird eine gebirgsschonende Auffahrmethode mit Teil- oder Vollschnittmaschinen empfohlen. Als Sofortsicherung ist aufgrund der hohen Wasserempfindlichkeit von Tonen ein Ankerabau mit einer Spritzbetonkonsolidierungsschicht (ca. 7 cm) an Stößen und Firste einzusetzen. In Abhängigkeit von den geomechanischen Gegebenheiten des Gebirges und der Streckenform kann minimal ein einschaliger, armierter Spritzbetonausbau mit Sohlenschluss oder maximal ein zweischaliger, armierter Spritzbetonausbau mit Sohlenschluss erforderlich sein. Weiterhin können gebirgsstabilisierende Maßnahmen durch Injektion von Silikatharzen ausgeführt werden.

Die Untersuchungen der Erstellbarkeit von Einlagerungsbohrlöchern in Ton durch Übertragung gängiger Bohrverfahren von über Tage auf unter Tage ergab eine grundsätzliche Anwendbarkeit für das Endlagerkonzept im Ton. Das anzuwendende Verfahren ist letztendlich von der gewählten Tonformation abhängig.

3.2 Beschreibung des „Technischen Endlagerkonzeptes in Ton“

In den nachfolgenden Abschnitten wird das technische Endlagerkonzept in Ton beschrieben. Dazu wird das zugrundegelegte Abfallmengengerüst aufgeführt und die entsprechenden Endlagerbehälter beschrieben. Die ausgewählten Endlagerbehälter wurden konzeptionell den Erfordernissen des Wirtsgesteins Ton entsprechend angepasst, wobei Grundkonzepte aus europäischen Ländern dabei berücksichtigt wurden. Die Beschreibung schließt mit der Darstellung von durchgeführten thermischen Endlagerauslegungen für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern sowie für die Bohrlochlagerung von BSK 2- und HAW-Kokillen.

Hierzu wurden für die Auswahl des Modellgebietes die Mindestanforderungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd /3-1/ an das Wirtsgestein des Endlagers berücksichtigt.

3.2.1 Abfallmengenszenarium - Stand 2002

Im Jahr 1999 waren in Deutschland 19 Leichtwasserreaktoren mit einer Leistung von etwa 22 GWe brutto in Betrieb. Der Betreiber des KKW Mülheim-Kärlich hat sich in der am 11.06.2001 unterschriebenen Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen verpflichtet, den Genehmigungsantrag für das KKW Mülheim-Kärlich zurückzuziehen. Damit geht das bisher durch Gerichtsentscheidung stillgelegte Kraftwerk nicht wieder in Betrieb.

Mit dem „Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“ und der damit verbundenen Änderung des Atomgesetzes – AtG /3-7/ vom 22. April 2002 verringerten sich die zukünftig zu erwartenden Abfallmengen. Für die Untersuchungen für ein Endlagerkonzept in Ton wird im Folgenden diese verringerte Abfallmenge angenommen.

Mit Inkrafttreten der Atomgesetznovelle gelten zurzeit für die weiteren Planungen die in Tabelle 3-1 aufgeführten gegenüber dem in Kap. 2.2.1 aufgeführten „Abfallmengenszenarium Konzept Endlager Gorleben – Stand 1998“ verringerten Abfallmengen /3-8/

	Abfallgebinde-Volumina m³
Verglaste Abfälle	860
Verpackte Brennelemente	16.373
CASTOR THTR	1.974
CASTOR MTR2	128
BNFL 560 I-Fass	2.808
Summe	22.143

Tabelle 3-1: Prognostizierte Abfallgebinde-Volumina für wärmeentwickelnde Abfälle bis zum Jahr 2030

16.373 m³ verpackte Brennelemente entsprechen einem Abfallaufkommen von 8.947 t SM. Unter Berücksichtigung dieses Gebindeaufkommens ergeben sich die in Tabelle 3-2 zusammengestellten Gebindeanzahlen /3-9/.

Herkunft Behältertyp	COGEMA BNFL	WAK	BNFL	LWR-BE incl. Mox	THTR/ AVR	VKTA/ FRMII
Verglaster HAW (Kokillen)	4.778	130	-	-	-	-
CSD-C Kokillen	8.764	-	-	-	-	-
560 I-Fässer	-	-	2.052	-	-	-
POLLUX-10- Behälter	-	-	-	1.657	-	-
THTR/AVR- Castoren	-	-	-	-	459	-
VKTA/FRMII	-	-	-	-	-	51

Tabelle 3-2: Gebindeanzahl wärmeentwickelnder Abfälle in Abhängigkeit von der Herkunft

Grundlage zur Erstellung des Technischen Endlagerkonzeptes in Ton ist das dargestellte Abfallmengengerüst. Für die Erstausslegung des Technischen Endlagerkonzeptes werden HAW-Kokillen, POLLUX-Behälter und Brennstabkokillen berücksichtigt. Die im späteren beschriebenen thermomechanischen Auslegungsrechnungen ergaben aufgrund der Grenztemperatur von 100 °C die Erfordernis, den Inhalt des POLLUX-Gebindes auf die Stäbe dreier Brennelemente und den Inhalt des BSK-Gebindes auf die Brennstäbe zweier Brennelemente zu reduzieren. In Tabelle 3-3 sind die entsprechenden Behältermengen dargestellt.

Endlagergebinde	POLLUX-3-DWR oder BSK 2		HAW-Kokille
tSM pro Gebinde	1,6	1,08	-
Masse pro Gebinde [t]	ca. 38	ca. 4	ca. 0,5
Anzahl der Gebinde	5.524	8.286	4.778

Tabelle 3-3: Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung (POLLUX-3-DWR oder BSK 2) und Anzahl der HAW-Kokillen

3.2.2 Behälterkonzepte und -materialien

International anerkanntes Prinzip bei der Errichtung eines Endlagers für radioaktiver Abfälle ist das Mehrbarrierenkonzept. In dem Mehrbarrierenkonzept, das als das Konzept zur Gewährleistung der Schutzziele (Schutz von Mensch und Umwelt vor den Auswirkungen ionisierender Strahlung) anerkannt ist, wird unterschieden zwischen technischen Barrieren (Abfallmatrix, Abfallbehälter, Versatz, Abschlussbauwerke für Kammern, Bohrlöchern, Strecken und Schächten) sowie natürlichen (geologischen) Barrieren (Wirtsgestein und seine Umgebung aus Deck- und Nebengebirge).

Die langfristige Schutzfunktion (Erhaltung der Barriereneigenschaften und Erhaltung der langfristig sicheren Lagerungsbedingungen für die Endlagerbehälter) muss von der geologischen Barriere, also vom Wirtsgestein und in Ergänzung auch vom Deck- und Nebengebirge übernommen werden.

Art und Umfang der technischen Barrieren sind stark abhängig von dem gewählten Endlagerkonzept und dem verfügbaren Wirtsgestein. Wesentlicher Bestandteil der technischen Barrieren sind die Behälter, in denen die radioaktiven Abfälle endgelagert werden. Diese Behälter haben die grundsätzliche Funktion über einen längeren Zeitraum einen sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten und einen Zutritt von Wasser, von dem Radionuklide aus den Abfällen herausgelöst und in die Biosphäre transportiert werden können, auszuschließen.

Wesentliche Faktoren, die die Konstruktion der Endlagerbehälter bestimmen, sind:

- Art der Konditionierung der Abfälle (Einschluss in eine Glasmatrix, Zementierung, komplette Brennelemente oder gezogene Brennstäbe, Verwendung von Primärbehältern, etc.)
- Aktivitätsinventar der Abfälle (HAW, ILW, LLW, langlebige Radionuklide, kurzlebige Radionuklide)
- Wärmeerzeugung der Abfälle
- Wirtsgesteinsinformation des Endlagers
- System der übrigen technischen Barrieren
- Schutzziele, denen die Endlagerbehälter entsprechen sollen, wie z. B.
 - Erhalt der Integrität der Behälter bei definierten Störfällen während des Einlagebetriebs, wie Fall und Feuer
 - Einhaltung von Leckraten bezüglich des Austrittes von Gasen
 - Erhalt der Integrität der Behälter über lange Zeiträume (Korrosionsfestigkeit, Druckfestigkeit etc.)

Die Einhaltung der Schutzziele ist in den Sicherheitsbewertungen für die Einzelbarrieren und das Endlager insgesamt nachzuweisen.

Auf Grund der o. g. Faktoren weisen die in den nachfolgend beschriebenen Endlagerkonzepten europäischer Länder enthaltenen Endlagerbehälter wesentliche Unterschiede in ihrer konstruktiven Auslegung auf.

3.2.2.1 Internationale Behälterkonzepte und Materialien in Ton

Im Anlagenband 1 „Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton“ sind für die Länder Belgien, Frankreich, Schweiz und Spanien die Endlagerkonzepte mit den entsprechenden Randbedingungen, wie das zu berücksichtigende Abfallinventar und die

Behälterkonzepte, ausführlich dargestellt. Im Folgenden werden die Hauptmerkmale zur Auslegung der Endlagergebinde in den einzelnen Ländern zusammenfassend dargestellt.

Belgien

Verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung ausgedienter Brennelemente bei Cogema werden in Cogema-Kokillen konditioniert.

HAW Hülsen-, Strukturteile und technologische Abfälle aus der Wiederaufbereitung bei der Cogema werden kompaktiert und gleichfalls in Cogema-Kokillen konditioniert.

Flüssiger HAW aus der Wiederaufbereitungsanlage Eurochemic wird verglast und in Austenitstahlfässern konditioniert. Fester HAW wird in Austenitstahlfässer einzementiert.

Alle Primärbehälter mit HAW sollen in wasserdichte HAW-Endlagerbehälter verpackt werden /3-10/, /3-11/. Diese Endlagerbehälter werden neben der Bentonitverfüllung der Einlagerungsstrecken als die entscheidende technische Barriere betrachtet /3-12/. So soll die Integrität des Behälters mindestens für die sogenannte Heizperiode – Zeit, in der die Aufwärmung des Nahfeldes mehr als 10 K gegenüber der Temperatur der ungestörten Formation beträgt – erhalten bleiben. Die Zeitdauer dieser Periode wird für verglaste Abfälle mit ca. 300 Jahren und für ausgediente Brennelemente mit ca. 2000 Jahren angegeben /3-11/, /3-13/.

Die Kenndaten des HAW-Endlagerbehälters sind nach, /3-12/, /3-13/, /3-14/ folgende:

– Material	Austenitstahl	AISI 316L hMo
– Außendurchmesser	520 mm	
– Wandstärke	30 mm	
– Länge	1580 mm	
– Mittlere Gesamtmasse	1000 kg	

Der Endlagerbehälter ist an den Enden mit jeweils vier Rollen im radialen Abstand von 90° ausgerüstet, die für die Führung dienen und das Einbringen in das Einlagerungsrohr im Endlager erleichtern.

Für die Option der direkten Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes wurden Konzepte für die Zwischenlagerung und Konditionierung der Brennelemente einschließlich der MOX-Brennelemente entwickelt /3-15/. Es ist vorgesehen, jeweils ein Brennelement in einem dünnwandigen Behälter endzulagern. Im Behälter befindet sich ein Korb für die Positionierung des Brennelementes. Der Rundbehälter soll aus Austenitstahl AISI 316 L mit einer Wandstärke von 9,53 mm gefertigt werden. Der Behälter-

deckel wird mit dem Behälterkörper nach Beladung mit einem Brennelement verschweißt. Im Deckel befindet sich eine Öffnung, durch die der verbleibende Hohlraum des mit dem Brennelement beladenen Behälters mit Sand verfüllt wird. Die Deckelöffnung wird anschließend mit einem Stopfen verschlossen, der mit dem Deckel verschweißt wird. Der Behälter ist an der Außenwand ebenso mit Rollen ausgerüstet, die den Transport innerhalb des Einlagerungsrohrs im Endlager erleichtern.

Auf Grund der unterschiedlichen Abmessungen der Brennelemente der belgischen Kernkraftwerke wird die Länge der Endlagerbehälter unterschiedlich sein. Nach den vorliegenden Angaben kann die maximale Länge eines Behälters bei 5,1 m liegen.

Schweiz

Zum Behälterkonzept der Schweiz liegen nur vereinzelte Informationen vor. Kokillen mit verglastem HAW als Primärbehälter sollen in einem verlorenen Abschirmbehälter endgelagert werden.

Als Material für den mit Blei abgeschirmten HAW-Endlagerbehälter wurden Titan oder Tantal, Hasteloy B bzw. Austenitstahl (Stahl 1.4439) angegeben. Die endgültige Auswahl des Materials soll entsprechend den standortspezifischen Randbedingungen erfolgen.

Nach /3-10/ sollen die Primärcontainer mit verglasten HAW bzw. ausgedienten Brennelementen in massive Endlagerbehälter aus Stahl bzw. Kupfer mit verschweißtem Deckel verpackt werden. Die Standfestigkeit der Stahlcontainer wird mit 1000 Jahre bewertet /3-16/, die der Kupferbehälter mit 10^5 Jahren /3-17/. Der Außendurchmesser eines Stahl-Endlagerbehälters ist in /3-18/ mit 940 mm angegeben.

Nach /3-19/ sollen die Primärbehälter mit verglasten langlebigen mittelaktiven radioaktiven Abfällen in einen zylindrischen Stahlbehälter mit einer Wandstärke von 0,25 m, einer Länge von ca. 2 m und einem Durchmesser von ca. 1 m verpackt werden.

Weiterhin sollen die Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente als zylindrische Stahlbehälter ausgebildet werden mit einer Mindestwandstärke von 0,15 m, einer Länge von ca. 5 m und einem Durchmesser von ca. 1 m. In einen Endlagerbehälter ist beabsichtigt, entweder 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelemente zu verpacken.

Frankreich

Das Behälterkonzept der ANDRA sieht eine Vielzahl von Behältertypen vor, die nach ausgewählten Kriterien für die verschiedenen Abfallarten bestimmt wurden /3-20/, /3-21/. Die Hauptkriterien sind folgende:

- Physikalisch-chemische Kenndaten der Abfälle
 - Abfallart
 - Material der Matrix und Behältermaterial
 - Inhalt an organischen Substanzen
- Art der Konditionierung der Abfälle
- Kritikalität – Anteil an Spaltmaterial in den Abfällen
- Wärmeerzeugung
- Gaserzeugung
- Geometrie und Gewicht der Gebinde

Im weiteren werden die Behälterkonzepte für die Abfälle betrachtet, für die eine geologische Endlagerung vorgesehen sind. Entsprechend der in Frankreich geltenden Klassifizierung der radioaktiven Abfälle /3-22/, sind das die folgenden:

- Mittelaktive Abfälle (ILW) (Abfallkategorie B) - die langlebige Emitter enthalten, einschließlich α -Emitter mit einer Aktivität über 0,37 GBq/t
- Hochaktive oder langlebige Abfälle (HAW) (Abfallkategorie C) – ausgedienter Kernbrennstoff (CU) oder bereits konditionierte Abfälle aus der Wiederaufbereitung (C). Die Abfälle enthalten hochaktive Spaltprodukte und Aktinide mit einer signifikanten Wärmeentwicklung

Im Anlagenband 1 sind 7 verschiedene Primärbehältertypen für verglaste Abfälle aufgeführt. Alle Behälter sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und werden mit Ausnahme des Behältertyps C0.1 mit einem verschweißten Deckel verschlossen und sind wasserdicht. Das durchschnittliche Gewicht der gefüllten Behälter mit Ausnahme der C0.1 Behälter beträgt ca. 500 kg, der gefüllte C0.1 Behälter wiegt ca. 90 kg.

Die Primärbehälter mit verglasten Abfällen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden. 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. Der Schutz der Glasmatrix vor Faktoren, die eine signifikante Veränderung der Matrix hervorrufen könnten (wenigstens in der Zeit, in der die Abfälle noch eine signifikante Restwärmeentwicklung aufweisen), ist eine weitere Auslegungsanforderung an den Endlagerbehälter. Durch die im Verhältnis

zu den Primärbehältern größere Oberfläche der Endlagerbehälter wird die Wärmeabgabe an die Umgebung erhöht.

Die Endlagerbehälter sollen aus nichtlegiertem Stahl hergestellt werden. Die minimale Wandstärke der Behälter wurde mit 55 mm bestimmt, um eine Standfestigkeit der Behälter gegen Korrosion und 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, um die Endlagerung in Röhren durchführen zu können, mit keramischen Gleitern versehen.

Im Anlagenband 1 sind weiterhin die Primärbehälter für die verschiedenen ausgedienten Brennelemente und Brennstoffproben aufgeführt. Daten zu den Abmessungen der Brennelemente-Primärbehälter liegen nicht vor. Für Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente sollen entsprechend der unterschiedlichen Länge der Brennelemente der Reaktoren 900 MW und 1300 MW zwei verschiedene Typen eingesetzt werden. Es werden jeweils vier Stück in einen Behälter verpackt. Das Gewicht der gefüllten Primärbehälter beträgt 2660 kg bzw. 3100 kg. Die Primärbehälter sollen mit Helium gefüllt werden, um die Wärmeabgabe aus den Brennelementen zu erhöhen. Die MOX-Brennelemente werden einzeln verpackt. Das Gewicht der MOX-Brennelemente beträgt 660 kg. Die Wärmeentwicklung eines Behälters mit Uranoxid- und Natururanoxid-BE (CU 1) 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 Wärmeentwicklung eines Behälters mit einem MOX-Brennelement (CU 2) beträgt nach 60 Jahren Abklingzeit ca. 1300 W und verringert sich auf ca. 200 W nach 1000 Jahren. Die Gasentwicklung der Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente eines Behälters beträgt insgesamt ca. 4720 l. Die Gasentwicklung der MOX-Brennelemente wird untersucht. Zu den weiteren im Anlagenband 1 aufgeführten Primärbehältern liegen keine Informationen vor.

Die Primärbehälter mit den ausgedienten Brennelementen sollen 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. Die Endlagerbehälter sollen aus unlegiertem Stahl hergestellt werden. Die Wandstärke der Behälter wurde so ausgewählt, dass sie wasserdicht über eine Zeit von ca. 10 000 Jahren verbleiben und einem isotropischen Druck von 19 MPa widerstehen. Damit soll gleichzeitig die Möglichkeit einer Rückholung der Endlagerbehälter gewährleistet werden.

Die BE-Endlagerbehälter bestehen aus drei Teilen – dem zylindrischen Gehäuse, dem Behältereinsatz und einem Deckel mit Konstruktionselementen für die Handhabung der Behälter. Die Höhe der Endlagerbehälter ist der Höhe der zwei Primärbehältertypen angepasst und beträgt zwischen 4880 mm und 5630 mm. Der Durchmesser der Endlagerbehälter beträgt 1200 mm. Die Wandstärke der Endlagerbehälter soll 110 mm

betragen. Der beladene Endlagerbehälter hat eine Masse von ca. 100 t bei einem Eigengewicht von ca. 60 t. Der Behältermantel ist an beiden Enden mit Stützgleitern mit einer Höhe von 50 mm und im mittleren Teil mit Führungsgleitern mit einer Höhe von 10 mm für den Luftkissentransport der Behälter versehen. Die Gleiter sind aus einem keramischen Material hergestellt.

Der Behältereinsatz hat folgende Funktionen:

- Aufnahme des Außendruckes, der auf den Endlagerbehälter wirkt
- Beherrschung der Kritikalität
- Fixieren der Brennelemente bei minimalem freien Volumen
- Unterstützung der Wärmeabgabe von den Brennelementen an die Umgebung.

Der Behältereinsatz ist in zylindrisch geformte Abteilungen unterteilt, die für die Aufnahme der Primärbehälter mit den Brennelementen bestimmt sind. Im Falle der Verpackung von Brennelementen ohne Primärbehälter, ist der Einsatz in quadratisch geformte Abteilungen unterteilt. Endlagerbehälter mit Brennelementen ohne Primärbehälter werden mit Helium gefüllt.

Spanien

Auch zum Behälterkonzept Spaniens für ein geologisches Endlager liegen nur sehr begrenzte Informationen vor.

Die HAW- Abfälle und ausgediente Brennelemente sollen in Endlagercontainer aus Stahl mit folgenden Abmessungen verpackt werden /3-23/:

- Kohlenstoffstahlbehälter
- Außendurchmesser 0,9 m
- Innendurchmesser 0,7 m
- Länge 4,54 m

Es werden jeweils vier DWR-BE oder 12 SWR-BE oder drei HAW-Kokillen in einen Endlagercontainer gepackt. Der verbleibende Hohlraum soll mit kleinen Glaskugeln verfüllt werden. Das Gesamtgewicht eines Endlagergebundes mit vier DWR-BE beträgt ca. 15 t. Die Ausgangswärmeleistung pro Gebinde beträgt ca. 1200 W. Die Lebensdauer der Container wird mit mindestens 1000 Jahren angegeben.

3.2.2.2 Konditionierung und Standzeiten

Im folgenden werden die betrachteten internationalen Konzepte zur Konditionierung von radioaktiven Abfällen und zu Standzeiten von Endlagerbehältern zusammengefasst.

Konditionierung

Die flüssigen Abfälle sowie Strukturteile aus der Wiederaufbereitung ausgedienter Brennelemente werden in allen 4 betrachteten Ländern in sogenannten Primärbehältern konditioniert, wobei die flüssigen Abfälle verglast werden. Die Primärbehälter werden dann in Endlagerbehälter verpackt.

Die Anzahl der Primärbehälter pro Endlagerbehälter ist unterschiedlich, von einem bis drei Primärbehälter pro Endlagerbehälter. Die Anzahl der Primärbehälter pro Endlagerbehälter wird im Zusammenhang mit der Wärmeleistung der Primärbehälter und der Endlagerkonstruktion (Abstand zwischen den Endlagerbehältern, Abstand zwischen den Endlagerzellen, Konstruktion der technischen Barrieren) sowie der Einlagerungstechnik bestimmt. Maßgebliches Kriterium ist dabei die Einhaltung einer maximalen Temperatur an der Kontaktgrenze zwischen Oberfläche des Endlagerbehälters und Bentonitbarriere von 100 °C. Eine Ausnahme hiervon ist das Schweizer Konzept, das 100 °C erst innerhalb der Bentonitbarriere erreicht und somit einen Teil der Barriere gezielt opfert. Dieser Opferbereich wird durch eine größere Schichtdicke der Bentonitbarriere ersetzt.

In allen vier betrachteten Ländern ist eine Endlagerung kompletter ausgedienter Brennelemente vorgesehen, d. h. ein Konsolidieren der Brennelemente mit nachfolgender Endlagerung der verdichteten Brennstäbe ist in den Planungen nicht berücksichtigt. Die Brennelemente sollen entweder direkt in Endlagerbehälter verpackt werden (Belgien, Schweiz, Spanien) oder erst in Primärbehälter (Frankreich), die dann in Endlagerbehälter verpackt werden. Die Anzahl der Brennelemente pro Endlagerbehälter reicht von einem Brennelement bis zu 12 Brennelementen. Auch hier gilt das o. g. Temperaturkriterium von maximal 100 °C (wieder mit Ausnahme der Schweiz) an der Kontaktgrenze zur Bentonitbarriere.

Standzeit

Die in den Endlagerkonzepten der einzelnen Länder aufgeführten Mindeststandzeiten der Endlagerbehälter werden im Rahmen der nationalen Sicherheitsanalysen des Endlagers bestimmt. Die Standzeit der Behälter hängt maßgeblich von dem gewählten Behältermaterial und der Konstruktion der Behälter ab. Tabelle 3-4 zeigt eine Übersicht über die verfügbaren Daten für HAW- und BE-Endlagerbehälter. Angegeben werden jeweils die Standzeit, das Material und die Abmessungen der Endlagerbehälter.

	Standzeit [a]	Behältermaterial	Abmessungen [mm]
Belgien			
HAW	300	Austenitstahl X2 CrNiMo N17-12-2	Ø 520 Länge: 1580 Wandstärke : 30
Brennelemente	2000	Austenitstahl X2 CrNiMo N17-11-2	Ø 356 Höhe: 4475 Wandstärke: 9,53
Schweiz			
HAW	1000	Austenitstahl X2 CrNiMo N17-11-2	Ø 1000 Länge: 2000 Wandstärke: 250
Brennelemente	1000	Stahl (nicht spezifiziert)	Ø 1000 Länge: 5000 Wandstärke: 150
Frankreich			
HAW	1000	Unlegierter Stahl P235	Ø 590 - 655 Länge: 1342 - 1649 Wandstärke: 55
Brennelemente	10000	Unlegierter Stahl P235	Ø 1200 Länge: 4880 - 5630 Wandstärke: 110
Spanien			
HAW	Keine Daten	Stahl (nicht spezifiziert)	Ø 900 Länge: 4540 Wandstärke: 100
Brennelemente	1000	Stahl (nicht spezifiziert)	Ø 900 Länge: 4540 Wandstärke: 100

Tabelle 3-4: Kenndaten von HAW- und BE-Endlagerbehältern in Belgien, der Schweiz, Frankreich und Spanien

3.2.2.3 Korrosionsverhalten von Werkstoffen für Endlagerbehälter in Ton

Zum Korrosionsverhalten von Werkstoffen für Endlagerbehälter in Ton wurden eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. In Belgien wurden verschiedene Werkstoffe sowohl in situ als auch in Labors bezüglich ihrer Eignung als Endlagerbehältermaterial getestet /3-24/, /3-25/. Im Untertagelabor in Boom-Ton in der Nähe von Mol wurden u. a. Kohlenstoffstähle, rostfreie Stähle sowie Titan- und Nickellegierungen bei Temperaturen von 16°C, 90°C und 170°C getestet. Die chemische Zusammensetzung einiger der untersuchten Stähle ist in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Werkstoff-Kurzname	Werkstoff-Nr.	Bezeichnung	Zusammensetzung Gew. %								
			Cr	Ni	Mn	Si	C	Ti	Mo	Cu	S
X15CrNiSi 20-12	AISI 309 1.4828	Austenitischer Stahl	23	13	2	1	0.2				<0,03
X6Cr17	AISI 430 1.4016	Austenitischer Stahl	16,5			0,37	<0,08				<0,03
EEG Usinor	-	Feinkornbaustahl			0.67	0.27	0.11				
X6CrNiMoTi 17-12-2	1-4571	Austenitischer Stahl mit Ti	16-18	10-14				1	2-3		
1803 MoT	-	Hochlegierter Stahl	18	0,28				0,36	2		
UHB 904L	-	Hochlegierter Stahl	18,7	26,3	1,1		0,02		4,5	0,12	<0,035
X5CrNiMo 17-12-2	1.4401	Austenitischer Stahl	17,8	10,8	1,6	0,6	<0,08		2,1		
X2CrNiMo 17-12-2	1.4404	Austenitischer Stahl	16,9	11,0	1,54	0,54	0,017		2,08		0,001
X2CrNiMo 17-11-2	1.4406	Austenitischer Stahl	17,6	12,5	1,16	0,61	0,015		2,84		0,001
X6CrNiMoTi 17-12-2	1.4571	Austenitischer Stahl	16,8	10,7	1,08		0,044	0,3	2,05		0,009

Tabelle 3-5: Chemische Zusammensetzung in Belgien untersuchter Werkstoffe für Endlagerbehälter

Die Stähle, Werkstoff-Nr. 1.4828, 1.4571 und 1.4016 werden für die Fertigung von Primärbehältern eingesetzt. Die anderen Stähle wurden bezüglich ihrer Eignung als Material für Endlagerbehälter untersucht.

Die Testbedingungen waren prinzipiell folgende /3-26/:

- Direkter Kontakt des Materials mit Boom-Ton,
- Kontakt mit einer Atmosphäre im Gleichgewicht mit Boom-Ton,
- Kontakt mit einer Atmosphäre im Gleichgewicht mit Beton im Kontakt mit Boom-Ton.

Die Dauer der Experimente betrug zwischen zwei und sieben Jahre.

Die Muster aus Feinkornbaustahl zeigten bei allen Testbedingungen deutliche Korrosionsspuren - Lochkorrosion und Flächenkorrosion. Die Tiefe der Lochkorrosion und die Dicke der Flächenkorrosion hängen direkt von der Temperatur und Verweilzeit ab. Es wurden Korrosionsraten bis zu 9,0 µm/a ermittelt.

Für die Proben aus austenitischem (rostbeständigem) Stahl wurden folgende grundsätzliche Aussagen getroffen /3-25/:

- Bei den In-situ Versuchen zeigten alle Proben bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen, Temperaturen und Vorbereitung der Proben keinerlei Korrosionsspuren oder messbare Gewichtsverluste.
- Bezüglich des Stahles 1.4401 wurde weiterhin festgestellt, dass dieser Stahl bei Testtemperaturen im Bereich 16 °C bis 90 °C und einem Cl-Gehalt von 16 ppm (natürlicher Gehalt im Boom-Ton) resistent gegenüber Korrosion ist. Bei hohem Cl-Gehalt von 1000 ppm bzw. 10000 ppm ist dieser Stahl anfällig gegenüber Loch- und Spaltkorrosion.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurde von ONDRAF/NIRAS die Schlussfolgerung gezogen, dass Feinkornbaustähle nicht die Anforderungen auf sicheren Einschluss der Abfälle für eine Periode von einigen Tausend Jahren erfüllen. ONDRAF/NIRAS konzentriert deshalb die weiteren Untersuchungen auf legierte Stähle als Material für Endlagerbehälter /3-25/.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt des FZK, der FU Berlin, ENRESA/INASMET und SCK•CEN wurden Korrosionsuntersuchungen an ausgewählten Werkstoffen bezüglich deren Eignung als Material für die Fertigung von Endlagerbehältern in den Wirtsgesteinsformationen Salz, Granit und Ton durchgeführt /3-27/. Dabei wurden folgende Materialien untersucht:

- Feinkornbaustahl S355NL/TstE355 Werkstoff-Nr. 1.0508
- Austenitische Stähle

X2CrNiMo 17-12-2	Werkstoff-Nr.	1.4404
X2CrNiMo 17-11-2	Werkstoff-Nr.	1.4406
X6CrNiMo Ti17-12-2	Werkstoff-Nr.	1.4571
X12CrNi 23-13	Werkstoff-Nr.	1.4833
- Hochlegierte Stähle
 - Cronifer 1925 hMo
 - UHB 904L
- Nickellegierung Hastelloy C4
- Titanlegierung Ti99,8-Pd

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass die Legierung Ti99,8-Pd der aussichtsreichste Werkstoff für die Realisierung des korrosionsresistenten Behälterkonzeptes in den drei geologischen Formationen Steinsalz, Granit und Ton ist. Diese Legierung ist unter allen Prüfbedingungen beständig gegenüber Loch- und Spannungsrisskorrosion, und ihre Flächenkorrosion ist vernachlässigbar klein ($<1\mu\text{m/a}$).

Die Nickelbasislegierung Hastelloy C4 ist ebenfalls beständig gegenüber Lochkorrosion in oxidierendem Tonwasser und damit ein aussichtsreicher Behälterwerkstoff.

Die austenitischen Stähle sind anfällig gegenüber Lochkorrosion in Tonwasser bei höherer Cl-Konzentration. Auch in Granitwasser zeigt der Cr-Ni-Stahl AISI 316 L eine Anfälligkeit gegenüber Lochkorrosion. Damit könnten Endlagerbehälter aus Cr-Ni-Stahl ihre Langzeit-Barrierefunktion im Endlager durch Lochkorrosion verlieren.

Der Feinkornbaustahl TStE355 ist ein aktiv korrodierendes Material in Salzlösungen und Tonwasser und damit ist seine Korrosionsrate wesentlich höher als diejenige der korrosionsresistenten Werkstoffe Hastelloy C4 und Ti99,8-Pd. Allerdings führen die ermittelten Korrosionsraten des untersuchten unlegierten Stahls zu akzeptablen Korrosionszuschlägen für einen dickwandigen Behälter.

In /3-28/ wird über die Ergebnisse von Korrosionsuntersuchungen an den Werkstoffen

- Feinkornbaustahl S355NL/TstE355 Werkstoff-Nr. 1.0508
- Austenitische Stähle
 - X2CrNiMo 17-12-2 Werkstoff-Nr. 1.4404
 - X6CrNiMo Ti17-12-2 Werkstoff-Nr. 1.4571
- Hochlegierter Stahl UHB 904L
- Nickellegierungen
 - Hastelloy C4
 - Hastelloy C22
- Titanlegierung Ti/99,8-Pd

berichtet. Die Untersuchungsergebnisse bezüglich des Korrosionsverhaltens im Ton wurden wie folgt zusammengefasst:

- Der Feinkornbaustahl S355NL zeigt in Tonwasser (aerobe Bedingungen, 100 - 50.000 mg/l Cl-) bei 140 ° eine deutliche Flächenkorrosion.
- In Tonwasser (anaerobe Bedingungen) bei 16 °C und einem Cl- Gehalt von 50.000 mg/l sind die Werkstoffe Ti99,8-Pd, Hastelloy C4, Hastelloy C22 und der Cr-Ni Stahl UHB 904 L beständig gegenüber Lochkorrosion. Die austenitischen Stähle zeigen bei Cl-Konzentrationen höher als 20.000 mg/l Lochkorrosion. Bei der höheren Temperatur von 90 °C ist nur die Legierung Ti99,8-Pd beständig gegenüber Flächen- und Lochkorrosion.

- Bei dem Cr-Ni Stahl UHB 904L ist eine zunehmende Empfindlichkeit gegenüber Lochkorrosion mit steigendem Cl- Gehalt festzustellen. Allerdings sind bei dem Stahl UHB 904 L bei realistischen Cl- Gehalten in Ton keine ernsthaften Korrosionsprobleme zu erwarten.
- Die Legierungen Hastelloy C4 und Hastelloy C22 erweisen sich als empfindlich gegenüber Lochkorrosion nur in Tonwässern mit einem Cl- Gehalt höher als 20.000 mg/l. Bei 140 °C und aeroben Bedingungen in Tonwasser ist die Empfindlichkeit des Stahls UHB 904 L gegenüber Lochkorrosion deutlich höher als bei 90 °C.

In Frankreich wurden Untersuchungen zum Korrosionsverhalten des ausgewählten unlegierten Stahls P235 für die HAW- und BE-Endlagerbehälter durchgeführt. Korrosionsraten des Kohlenstoffstahles P235 liegen nicht vor. Auf der Grundlage einer Modellierung des Korrosionsverhaltens der Endlagerbehälter über die Lebensdauer der Behälter wurde unter Berücksichtigung der in den Einlagerungszellen herrschenden Bedingungen (Temperatur, β/γ -Strahlung, Wasser-Radiolyse, Reduktionspotential des umgebenden Mediums u. a.) eine „Korrosionsstärke“ von 27 mm für die HAW-Endlagerbehälter und von 83 mm für die BE-Behälter ermittelt. Unter Berücksichtigung von Unsicherheiten der Modellierung sowie der Standfestigkeit gegenüber dem Gebirgsdruck wurden die Wandstärken der HAW-Behälter und BE-Behälter auf 55 mm bzw. 110 mm bestimmt.

3.2.2.4 Auswahl der Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente und HAW-Kokillen

Die Auswahl der Endlagerbehälter für ein generisches Endlager in Ton wird von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt, die aus den unterschiedlichen Anforderungen an die Behälter in den verschiedenen Phasen des Endlagerbetriebes und in der Nachbetriebsphase resultieren. Mit den Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase ist nachzuweisen, dass die Endlagerbehälter ihre Funktion im Gesamtsystem der technischen und geologischen Barrieren erfüllen.

Es gibt Anforderungen an die Endlagerbehälter, die nicht von der Wirtsgesteinsformation abhängen. Hierzu können die nachfolgenden gerechnet werden /3-29/:

- Die ausgewählten Werkstoffe müssen stabil sein gegenüber der radioaktiven Strahlung aus dem Abfallinventar
- Aus Gründen der betrieblichen Sicherheit müssen sie möglichst große Abschirmwirkung haben oder ein innerbetrieblicher Transportbehälter muss diese Aufgabe übernehmen
- Die ausgewählten Materialien müssen in ausreichender Menge zu vertretbaren Kosten verfügbar sein, und zwar zum Teil über viele Jahrzehnte

- Die Behälterwerkstoffe müssen längerfristig korrosionsbeständig sein sowohl im Normalbetrieb als auch unter Störfallbedingungen
- Die technische Herstellung des Endlagerbehälters muss sicher und reproduzierbar zu den geforderten Qualitätsmerkmalen sein

Aus diesen Anforderungen aber auch aus den zusätzlich formationsspezifischen Anforderungen wurden bisher international nur metallische Werkstoffe für Endlagerbehälter abgeleitet.

In Auswertung der im Anlagenband 1 betrachteten Endlagerkonzepte verschiedener europäischer Länder sowie der thermischen Berechnungen in Kapitel 3.2.3 müssen bei der Auswahl der Endlagerbehälter in Tongestein eine Reihe spezifischer Anforderungen berücksichtigt werden:

- Bezüglich der Langzeitsicherheit bestehen Unterschiede bei der Endlagerung in Salz und Ton. Im Wirtsgestein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschlusses durch das Salzgestein. Deshalb ist die Barrierenfunktion der (natürlichen) geologischen Barriere (Wirtsgestein) und des Schachtverschlusses konzeptführend. Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen und geotechnischen Barrieren konzeptführend.
- Aus langzeitsicherheitstechnischen Gründen muss der Endlagerbehälter für eine sehr lange Zeit intakt bleiben, d. h. die Behälter müssen für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmilieu sowie dem Gebirgsdruck standhalten.
- Die Temperatur an der Behälteroberfläche darf 100 °C nicht überschreiten, um Siedeeffekte zu vermeiden. Der Siedeeffekt kann zu einer Anreicherung von Salz an der Oberfläche der Behälter führen, wodurch Korrosionseffekte hervorgerufen werden können, die schwer zu analysieren sind. Des weiteren wird bei Temperaturen über 100 °C die Barrierenwirkung des die Behälter umgebenden Bentonits beeinträchtigt.

Für die Materialauswahl und die Konstruktion der Endlagerbehälter im Tongestein ergibt sich daraus folgendes:

- Auf Grund der Temperaturbegrenzung (100 °C) kann nur eine vergleichsweise geringe Beladung des POLLUX-Behälters mit ausgedienten Brennelementen bzw. der BSK mit gezogenen Brennstäben erfolgen.

- Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz von korrosionsfesten Stählen bzw. durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierten Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung auf die Endlagersicherheit auswirken kann.
- Bei Einsatz von Brennstabkokillen für die Endlagerung gezogener Brennstäbe und HAW-Kokillen ist zu prüfen, ob diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden müssen, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

Ausgehend von den o. g. Anforderungen kann gefolgert werden, dass für die Endlagerung in Ton die für die Endlagerung in Salz vorgesehene Endlagerbehälter vom Typ POLLUX, die Brennstabkokille für Brennstäbe sowie HAW-Kokillen grundsätzlich eingesetzt werden können. Dabei sind Anpassungen entsprechend den spezifischen Anforderungen für die Endlagerung in Ton erforderlich.

Für die direkte Endlagerung bedeutet dies, einen modifizierten POLLUX-Behälter mit verringertem Durchmesser entsprechend der gegenüber dem Salz geringeren Beladung vorzusehen (s. Kapitel 3.2.3). Für den HAW kann der Einsatz der für die Endlagerung in Salz vorgesehene HAW-Kokillen evtl. in einem Overpack erfolgen. Für die Einlagerungskonzeptalternative Bohrlochlagerung von gezogenen Brennstäben kann der Einsatz von Brennstabkokillen (BSK 2) für die Brennstäbe aus zwei Brennelementen erfolgen. In Abbildung 3-6 ist ein POLLUX-Endlagerbehälter mit verringerter Beladung (Brennstäben aus 3 BE) dargestellt.

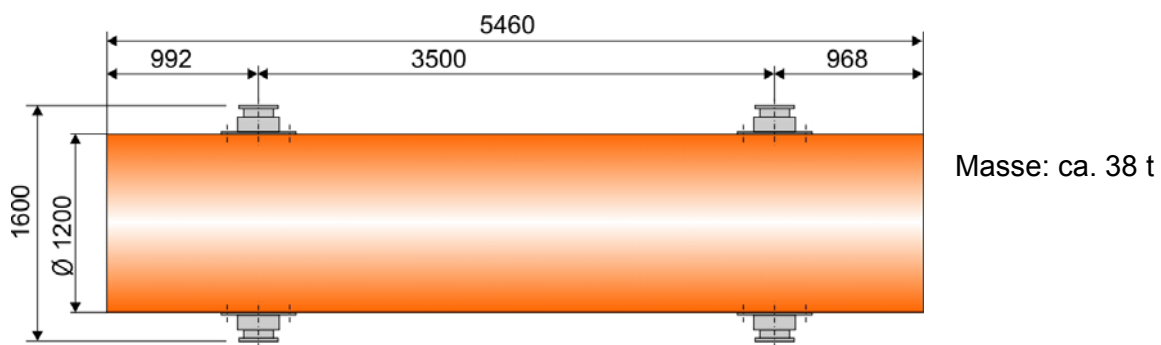


Abbildung 3-6: POLLUX-3-Endlagerbehälter

Der Außendurchmesser 1.200 mm sowie die Länge 5.460 mm sind eine grobe Abschätzung. Der endgültige Außendurchmesser sowie die endgültige Länge werden von der noch zu ermittelnden tatsächlich erforderlichen Abschirmdicke des Behältermantels bestimmt.

Als Endlagergebinde für die Bohrlochlagerung wurde im ersten Ansatz eine bentonitummantelte HAW-Kokille (siehe Abbildung 3-7), eingestellt in einen geschlitzt ausföhrbaren Transport- und Einlagerungskorb, konzipiert. Dieses Gebinde hat den Vorteil, dass eine qualitätsgesichert hergestellte Bentonitschale mit der HAW-Kokille zusammen als eine Einheit in das Bohrloch eingebracht werden kann. Der innerbetriebliche Transport des Endlagergebundes erfolgt mit einem speziellen Transferbehälter.

Die endgültige Dimensionierung der Bentonithölle aufgrund der Anforderungen aus langzeitsicherheitslichen Betrachtungen hat noch zu erfolgen.

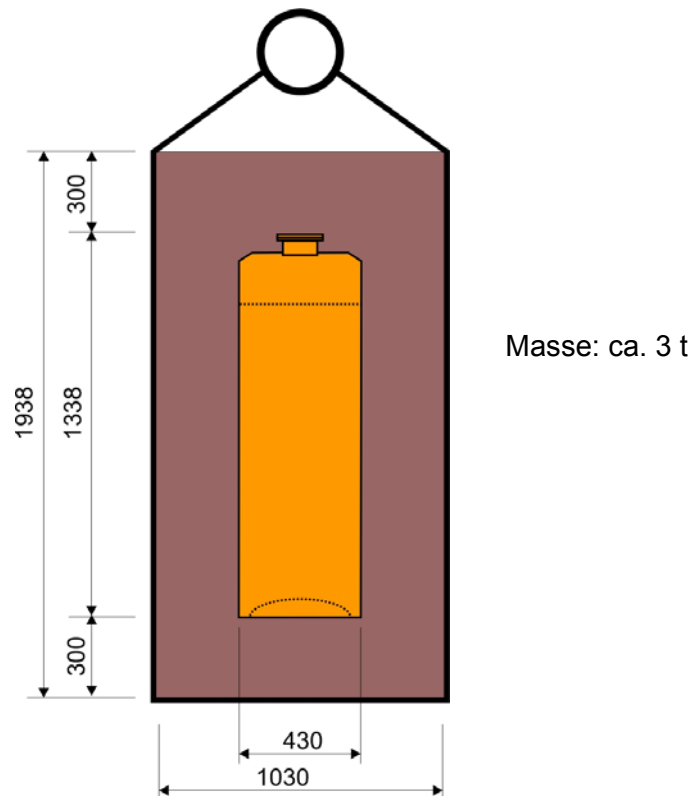


Abbildung 3-7: Bentonitummanteltes Endlagergebinde HAW-Kokille

Die in Kapitel 2.2.3 dargestellten radiologischen und thermischen Daten für hochaktiven Abfall wurden auch für das Endlager in Ton zugrundegelegt.

Zur Endlagerung von Brennstabkokillen in Bohrlöchern wurde ein ähnliches Gebinde wie zur Endlagerung von HAW-Kokillen konzipiert (siehe Abbildung 3-8)

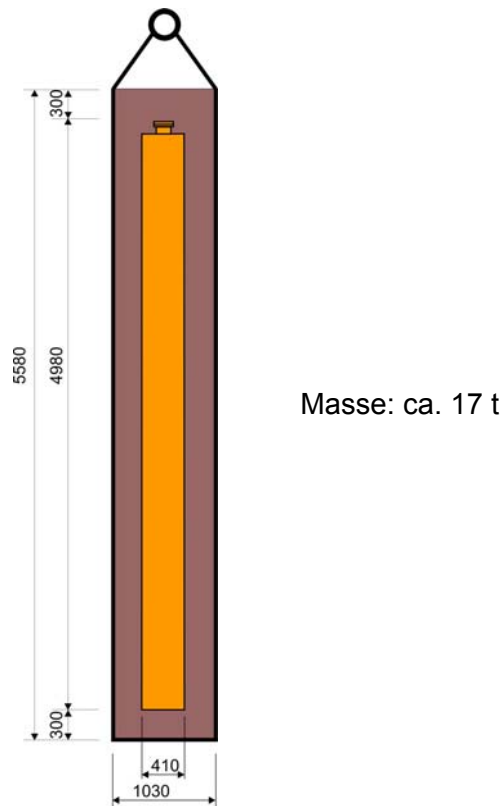


Abbildung 3-8: Bentonitummanteltes Endlagergebinde

In den folgenden Abschnitten werden die Methodik, die Annahmen und Grundlagen sowie die Ergebnisse thermischer Auslegungsberechnungen für ein Gesamtendlager dargestellt. Dabei werden die vorher beschriebenen Endlagerbehälter mit dem entsprechenden radioaktiven Abfall eingesetzt.

3.2.3 Thermische Endlagerauslegung für die Streckenlagerung von POLLUX-Endlagerbehältern

Der POLLUX-DWR-U-BE Endlagerbehälter wurde zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus DWR-Brennelementen für ein Endlager im Salz entworfen.

In den folgenden Untersuchungen für ein Endlager in Ton werden ähnlich aufgebaute Endlagerbehälter mit einer reduzierten Beladung zugrundegelegt. Betrachtet wurden:

- POLLUX-3-Behälter mit einem Inventar von 1,6 t SM (Durchmesser 1.200 mm)
- POLLUX-5-Behälter mit einem Inventar von 2,7 t SM (Durchmesser 1.296 mm)
- POLLUX-8-Behälter mit einem Inventar von 4,3 t SM (Durchmesser 1.560 mm)

In einem ersten Schritt wurden die Durchmesser der Behälter anhand des Flächenbedarfs für die gezogenen Brennstäbe ermittelt. Die Wanddicken des Abschirmbehältergrundkörpers (274 mm) sowie des inneren Behälters (161 mm) blieben unverändert. Die Länge der POLLUX-Behälter wurde mit ca. 5 460 mm angenommen.

3.2.3.1 Wärmeleistung der POLLUX-Behälter über die Zeit

In Tabelle 3-6 sind Wärmeleistungen für die Endlagerbehälter POLLUX-3 (Behälter beladen mit Brennstäben aus drei Brennelementen / 1,6 t SM), POLLUX-5 (Behälter beladen mit Stäben aus fünf Brennelementen / 2,7 t SM) sowie für einen POLLUX-8 (beladen mit Stäben aus acht Brennelementen / 4,3 t SM) auf Basis des Referenz-Brennelementes (s. Kap. 2.2.3.1) darstellt.

Zeit in a	Wärmeleistung POLLUX-3 (1,6 t SM) in W	Wärmeleistung POLLUX-5 (2,7 t SM) in W	Wärmeleistung POLLUX-8 (4,3 t SM) in W
1	21 220	35 370	56 590
2	11 840	19 740	31 580
5	4 700	7 830	12 530
6	3 650	6 080	9 720
10	3 030	5 050	8 080
15	2 580	4 290	6 870
20	2 320	3 860	6 180
30	1 930	3 210	5 140
40	1 620	2 700	4 320
50	1 390	2 320	3 710
70	1 050	1 760	2 810
100	760	1 260	2 020
120	640	1 060	1 700
150	520	880	1 400
200	420	700	1 120
500	230	390	620
1 000	130	220	350
10 000	30	50	80
100 000	3	6	10
1 000 000	0,003	0,006	0,01

Tabelle 3-6: Wärmeleistung der Endlagerbehälter POLLUX-3, POLLUX-5 und POLLUX-8 über die Zeit für Uran-DWR-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung

3.2.3.2 Auslegungsberechnungen – Berechnungsmethode - Modellgebiet

Die Temperaturfeldberechnungen wurden mit dem Programm FLAC 3D Version 2.1 /3-30/ durchgeführt. FLAC 3D 2.1 verwendet die Methode der Finiten Differenzen mit einem expliziten Verfahren sowie eine gemischte Diskretisierungstechnik, die eine Vernetzung mit unstrukturierten Gittern erlaubt. Für die Temperaturberechnung werden lineare Ansätze verwendet.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde von einer instantanen Einlagerung der Behälter ausgegangen. Eine zeitliche gestaffelte Einlagerung wurde nicht berücksichtigt. Infolge der Symmetriebedingungen liegt keine versetzte Anordnung der Behälter in benachbarten Einlagerungsstrecken vor. Ein Transport der Wärme über Grundwasserströmungen wurde vernachlässigt.

Bei der Vernetzung der für die Berechnung verwendeten numerischen Modelle wurde auf eine ähnliche Netzdichte in Behälternähe geachtet. Die feinste Diskretisierung liegt für die verschiedenen Modelle am Übergang Behälter/Bentonit mit Knotenabständen von ca. 3 cm vor. In Abhängigkeit von den Abmessungen des Modellgebietes kamen numerische Modelle verschiedener Größe (kleine Modelle mit ca. 21 300 Zonen und ca. 22 800 Knoten; große Modelle mit ca. 32 200 Zonen und ca. 33 750 Knoten) zum Einsatz. Abbildung 3-9 zeigt einen Ausschnitt eines numerischen Modells für den Teufenbereich – 496 m bis –550 m (linke Abbildung) sowie ein Detail der Vernetzung im Bereich des POLLUX-Behälters.

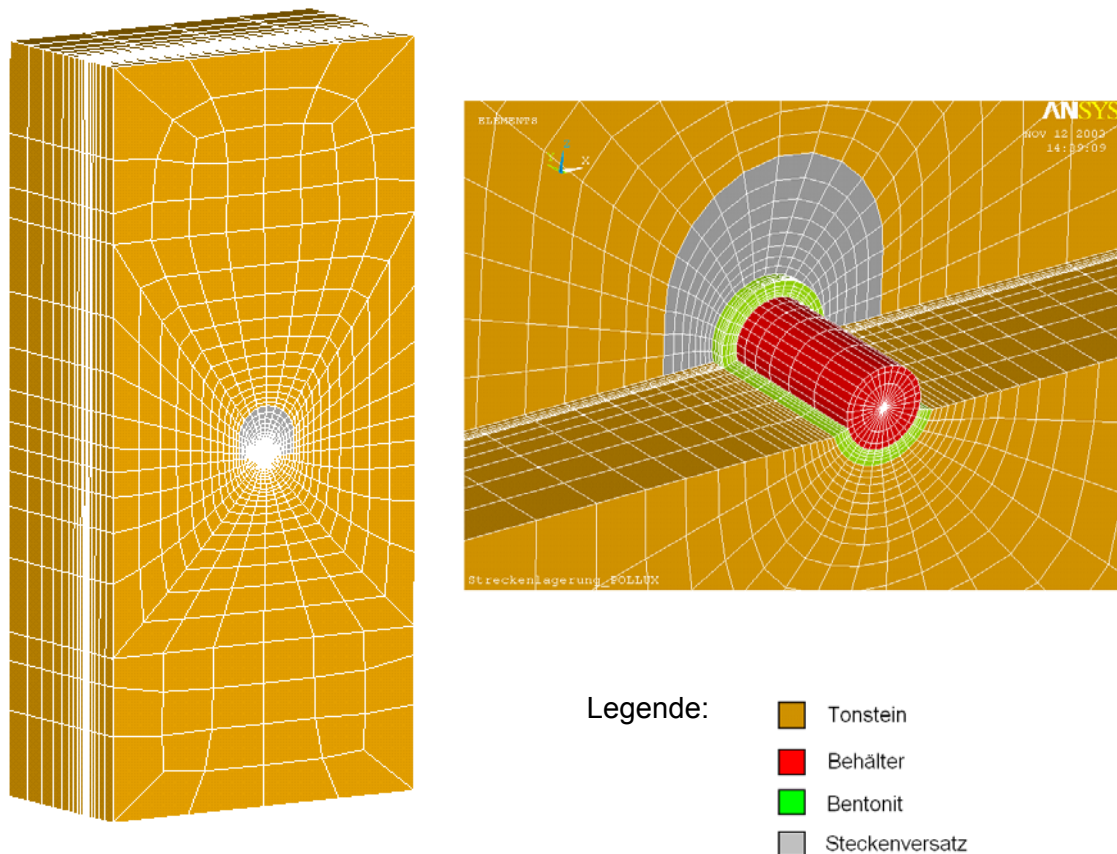


Abbildung 3-9: Darstellung der Diskretisierung des Modellgebietes (Ausschnitt)
linke Abb.: 3D-Blockdarstellung für den Teufenbereich 496 m bis -550 m
rechte Abb.: Detail der Vernetzung in Behälternähe

3.2.3.3 Modellbeschreibung - Geometrie des Modells / Modellgröße und Randbedingungen

Die Berechnungen erfolgten aus Gründen der Vereinfachung an einem Modellgebiet, welches als Ausschnitt repräsentativ für ein unendlich ausgedehntes Einlagerungsfeld im Tongestein steht (Abbildung 3-10). Die seitlichen Modellränder wurden in den Berechnungen als adiabatisch angenommen (kein Wärmetransport über die Ränder) und stellen somit Symmetrieebenen dar, welche diese Vereinfachung zulassen. Infolge der Symmetriebedingungen entspricht daher die Breite des Modells der zweifachen Hälfte des Streckenabstandes. Die Länge (Tiefe) des Modells ergibt sich zur Summe aus halbem Behälterabstand und halber Behälterlänge. Im Rahmen der Untersuchungen fand eine Variation der Modellparameter Behälterabstand d und Streckenabstand a_s statt.

Das Wirtsgestein wurde von der Tagesoberfläche bis zu einer Tiefe von 1 000 m modelliert und mit einem geothermischen Tiefengradienten von 3 K / 100 m bei $T(z = 0 \text{ m}) = 8 \text{ °C}$ initialisiert. Weitere geologische Schichten wurden nicht modelliert.

Es wird lediglich die Einlagerung auf einer Sohle des Einlagerungsfeldes betrachtet. Die Teufenlage der Einlagerungsstrecken wurde mit 525 m angenommen, um vergleichbare Randbedingungen (Anfangstemperaturen) zu den Konzepten der Bohrloch-lagerung zu erhalten. Dort wurde eine Bohrlochlänge von 50 m ab Streckensohle (500 m Tiefe) angenommen.

Des weiteren wurde in den Berechnungen angenommen, dass der Resthohlraum der Strecken komplett mit einem Verfüllbaustoff versetzt ist.

Weitere Details zu den Modellannahmen bezüglich Einlagerungskonfiguration sowie deren geometrische Abmessungen und Anordnung können Abbildung 3-10 entnommen werden.

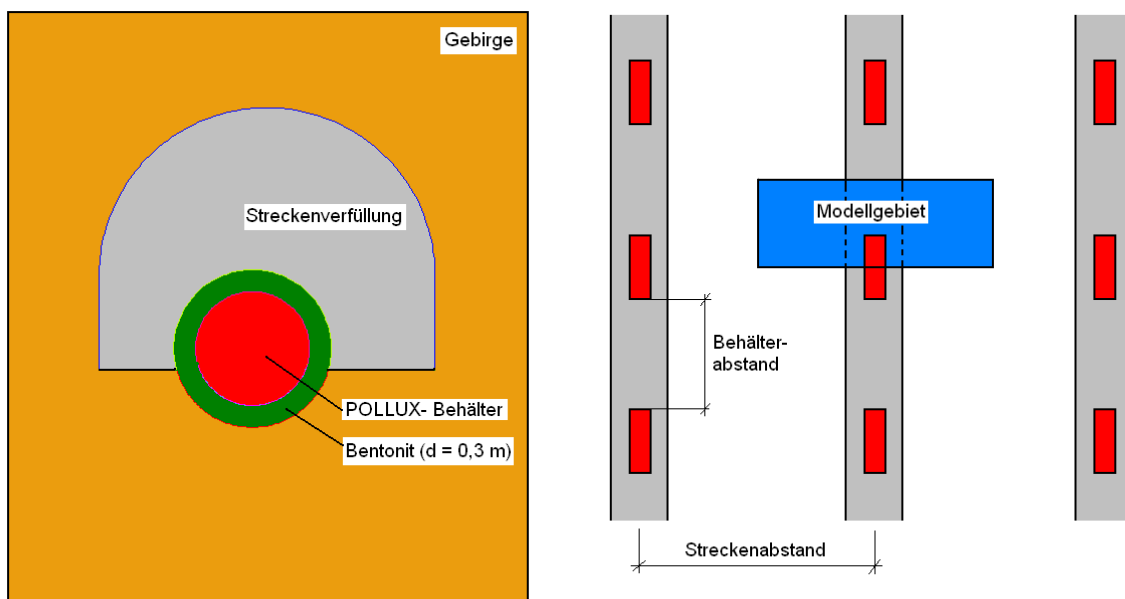


Abbildung 3-10: Modellannahme zur Einlagerungskonfiguration in Strecken sowie geometrische Anordnung

Verwendete Stoffgesetze und Materialparameter

Das thermische Verhalten der Materialien wird durch die Dichte ρ , die Wärmekapazität c_p und die Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben. Den modellierten Materialien (Behälter, Tonstein, Bentonit, Streckenverfüllung) wurden Materialparameter aus Literaturangaben zugewiesen, wobei für alle Materialien von thermisch isotropem Verhalten ausgegangen wird. Eine Zusammenfassung der verwendeten Materialparameter findet sich in Tabelle 3-7.

	Tonstein	Bentonit	Streckenverfüllung	Behälter
Dichte ρ in kg / m^3	2 180	1 800	2 120	6 226
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$	$\lambda = \lambda(T)$ 1,94 ... 1,40 ^{*3}	$\lambda = \lambda(T, w, \rho, p)$ 0,78 ... 0,85 ^{*1,2,3}	1,26	59,0
Spezif. Wärmekapazität c_p in $\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$	$c_p = c_p(T)$ 770 ... 962 ^{*3}	$c_p = c_p(w)$ 1 313 ^{*1}	927	3 860

- ^{*1} für Wassergehalt $w = 10\%$
- ^{*2} für atmosph. Druck $p = 0,1 \text{ MPa}$
- ^{*3} für Temperaturen $T = 8 \text{ °C} \dots 100 \text{ °C}$

Tabelle 3-7: Überblick zu den thermischen Materialparametern

Abhängigkeiten der Materialparameter des Tonsteins und Bentonites von weiteren physikalischen Zustandsgrößen werden im Folgenden dargestellt:

Tonstein

Für das Wirtsgestein Ton fanden beispielhaft Werte der Callovo-Oxfordian-Formation in Bure, Frankreich Verwendung. Die Dichte des Tonsteins wurde mit $2\,180 \text{ kg/m}^3$ angesetzt. In Laboruntersuchungen /3-31/ an Proben dieses Standortes wurde eine Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität c_p (15 Proben) und der Wärmeleitfähigkeit λ (20 Proben) festgestellt.

Bentonit

Die Dichte des Bentonites wurde mit $1\,800 \text{ kg/m}^3$ angesetzt. Die thermischen Materialparameter weisen Abhängigkeiten von der Temperatur, der Dichte und dem Wassergehalt auf.

Wärmequelle

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde davon ausgegangen, dass im gesamten Feld POLLUX-Behälter eingelagert werden. Die Wärmeleistung eines einzelnen Gebindes P wurde durch ein Pseudonuklidspektrum auf der Basis von fünf Nukliden P_i , $i=[1,5]$ approximiert. Die entsprechenden Zahlenwerte für POLLUX-3, POLLUX-5 und POLLUX-8 sind in Tabelle 3-8 angegeben.

Abbildung 3-11, Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 zeigen die Wärmeleistung eines POLLUX-3, POLLUX-5 bzw. POLLUX-8 Gebindes gemäß Tabelle 3-6 sowie die der einzelnen Pseudonuklide und deren Summe als Gesamtleistung P als Funktion der Zeit.

$$P = \sum_{i=1}^5 p_i \cdot e^{-\eta_i t}$$

wobei p_i „nuklidspezifische“ Anfangswärmeleistung [W]

t Zeit [s]

η_i „nuklidspezifische“ Aktivität [s^{-1}] mit $\eta_i = \ln 2 / t_i$

t_i „nuklidspezifische“ Halbwertszeit [s]

POLLUX 3	Pseudonuklid i				
	1	2	3	4	5
spez. Wärmeleistung p_i [W]	3 026 400	28 643	3 445,4	2 782,5	537,62
spez. Aktivität η_i [s^{-1}]	$2,397 \cdot 10^{-7}$	$2,331 \cdot 10^{-8}$	$8,11 \cdot 10^{-9}$	$7,169 \cdot 10^{-10}$	$4,917 \cdot 10^{-11}$
POLLUX 5					
spez. Wärmeleistung p_i [W]	4 044 000	47 738	5 742,3	4 637,5	896,03
spez. Aktivität η_i [s^{-1}]	$2,397 \cdot 10^{-7}$	$2,331 \cdot 10^{-8}$	$8,11 \cdot 10^{-9}$	$7,169 \cdot 10^{-10}$	$4,917 \cdot 10^{-11}$
POLLUX 8					
spez. Wärmeleistung p_i [W]	8 071 300	76 341	8 312,6	7382,6	1410,6
spez. Aktivität η_i [s^{-1}]	$2,38301 \cdot 10^{-7}$	$2,29 \cdot 10^{-8}$	$7,70686 \cdot 10^{-9}$	$7,107 \cdot 10^{-10}$	$4,81786 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 3-8: Pseudonuklidspektrum der Behälter POLLUX-3, 5 und 8

Für das Modell wurde keine Annahme über die Verteilung des radioaktiven Materials im Behälter getroffen, sondern der gesamte Behälter wurde aufgrund seiner signifikant höheren Wärmeleitfähigkeit gegenüber der des ihn umgebenden Wirtsgesteins als Wärmequelle angenommen.

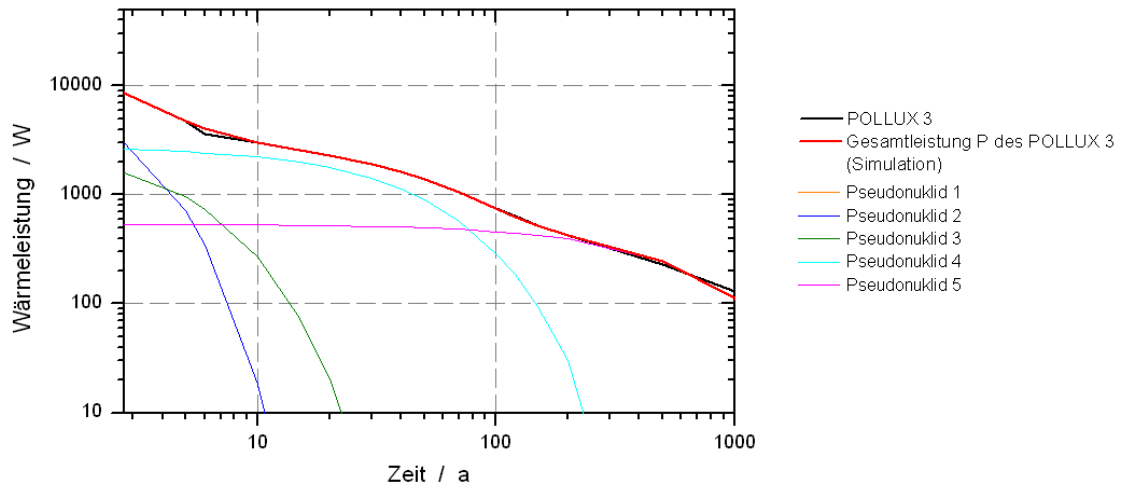


Abbildung 3-11: Wärmeleistung des POLLUX-3-Behälters bzw. der einzelnen Pseudonuklide

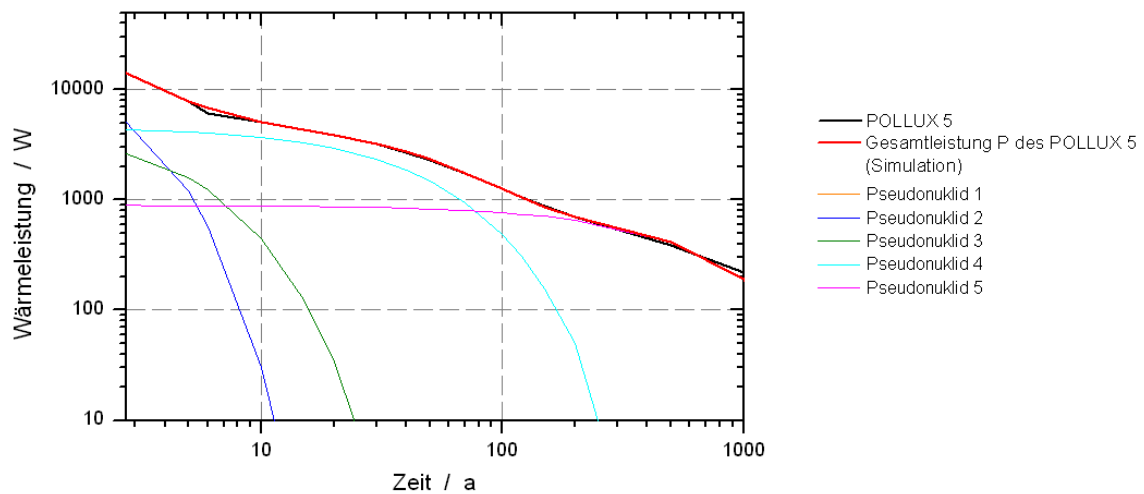


Abbildung 3-12: Wärmeleistung des POLLUX-5-Behälters bzw. der einzelnen Pseudonuklide

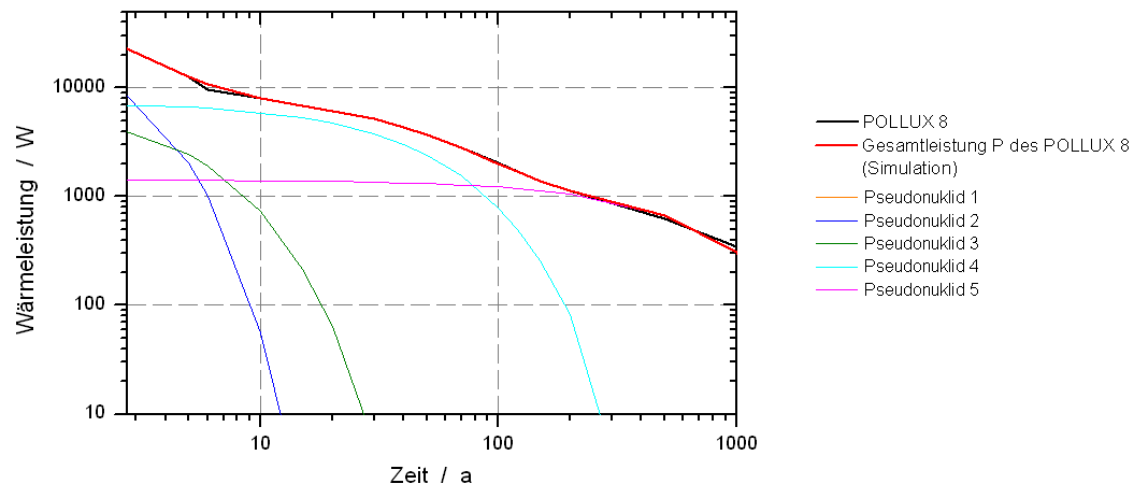


Abbildung 3-13: Wärmeleistung des POLLUX-8-Behälters bzw. der einzelnen Pseudonuklide

3.2.3.4 Ermittlung der Zwischenlagerzeit

In der ersten Untersuchungsphase erfolgte die Ermittlung der minimalen Zwischenlagerzeit. Die Untersuchungen wurden an einem numerischen Modell mit ausreichender Größe (Behälterabstand und Streckenabstand jeweils 100 m) durchgeführt, um Randeffekte auszuschließen. Unter den gewählten Randbedingungen wird durch das Modell innerhalb des Betrachtungszeitraums von 5 Jahren ein einzelner Behälter in einem unendlich ausgedehnten Einlagerungsbereich simuliert.

Die Untersuchungen zeigen, dass bei Beladung des Behälters mit den Brennstäben aus 8 Brennelementen (POLLUX-8) die Auslegungstemperatur von 100 °C erst nach einer Zwischenlagerzeit von ca. 91 a nicht mehr überschritten wird. Auch für das POLLUX-5-Gebinde wird die Auslegungstemperatur erst für Zwischenlagerzeiten nach ca. 61 a unterschritten. Für die Annahme einer Beladung des Endlagerbehälters mit den Brennstäben aus 3 Brennelementen (POLLUX-3) beträgt die minimale Zwischenlagerzeit ca. 30 a.

3.2.3.5 Ermittlung des Behälterabstandes d

In der zweiten Untersuchungsphase wurden die Behälterabstände innerhalb der Strecke variiert. Die Berechnungen erfolgten an einem numerischen Modell mit ausreichendem Streckenabstand von 100 m, sodass die daraus erwachsenden Randeffekte zu vernachlässigen sind. Durch das numerische Modell wird daher eine einzelne Strecke in einem unendlich ausgedehnten Einlagerungsbereich simuliert.

Für den POLLUX-3-Behälter wurde konservativ eine Zwischenlagerzeit von 31 a angenommen. Für die Auswertung der durchgeführten Berechnungsfälle wurde o. g. Untersuchungspunkt mit maximaler Temperatur gewählt.

Für Behälterabstände $d < 15$ m innerhalb einer Strecke zeigt sich ein deutlicher Überlagerungseffekt im resultierenden Temperaturfeld, wobei die maximalen Temperaturen für diese Berechnungsfälle z. T. deutlich über der Auslegungstemperatur lagen. Für Behälterabstände $d \geq 20$ m konnten wesentlich geringere Unterschiede zum Referenz-Berechnungsfall eines einzelnen Behälters (31 a Zwischenlagerzeit) beobachtet werden, wobei die Maximaltemperaturen unterhalb der Auslegungstemperatur lagen. Für den Berechnungsfall mit 20 m Behälterabstand trat eine Maximaltemperatur von 99,1 °C auf, die mit $DT = 0,5$ K über der Temperatur des Referenz-Berechnungsfalls lag.

Die weiteren Berechnungen erfolgten mit einem Behälterabstand in der Strecke von $d = 20$ m.

3.2.3.6 Ermittlung des Streckenabstandes a_s

Auf Basis der vorherigen Untersuchungsergebnisse (Zwischenlagerzeit: 31 a, Behälterabstand $d = 20$ m) erfolgte in Phase 3 eine Variation des Streckenabstandes. Die Ergebnisse zeigen bei geringer werdendem Streckenabstand eine exponentielle Zunahme der maximalen Temperatur (Abbildung 3-14). Durch die Überlagerung der Temperaturfelder eng benachbarter Einlagerungsstrecken kommt es zu einer Abnahme des Temperaturgradienten und somit zu einer Behinderung der Wärmeausbreitung. Infolge dieses Wärmetaus steigt die Temperatur für geringer werdende Abstände der Einlagerungsstrecken überproportional an. Dieser Effekt tritt für Streckenabstände $a_s < 30$ m besonders deutlich auf.

Abbildung 3-15 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe am heißesten Punkt des Modells für verschiedene ausgewählte Streckenabstände innerhalb eines Betrachtungszeitraumes von 33 Jahren. Der Zeitpunkt des Erreichens der Maximaltemperatur ist ebenfalls stark vom Streckenabstand abhängig und steigt für geringe Abstände stark an. Für Streckenabstände $a_s \geq 30$ m werden die Temperaturmaxima innerhalb von ca. 6 Jahren überschritten. Für diese Anordnungen bleiben die Maximaltemperaturen unterhalb 99,7 °C, wobei die Temperaturdifferenz zum Berechnungsfall einer einzelnen Strecke (Behälterabstand $d = 20$ m; $T_{\max} = 99,1$ °C) weniger als 1 K beträgt.

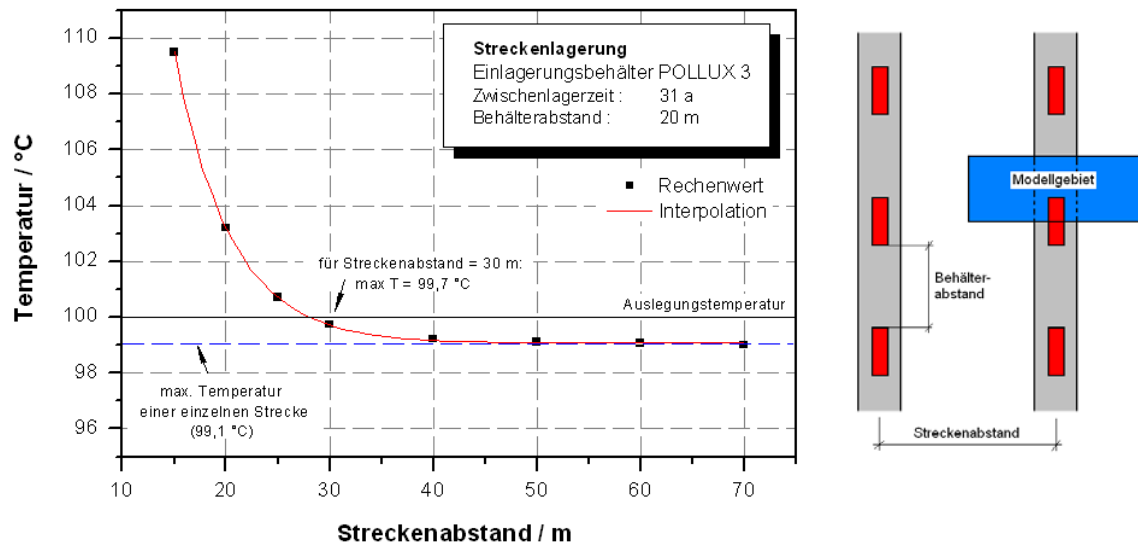


Abbildung 3-14: Maximaltemperatur am heißesten Punkt in Abhängigkeit vom Streckenabstand a_s

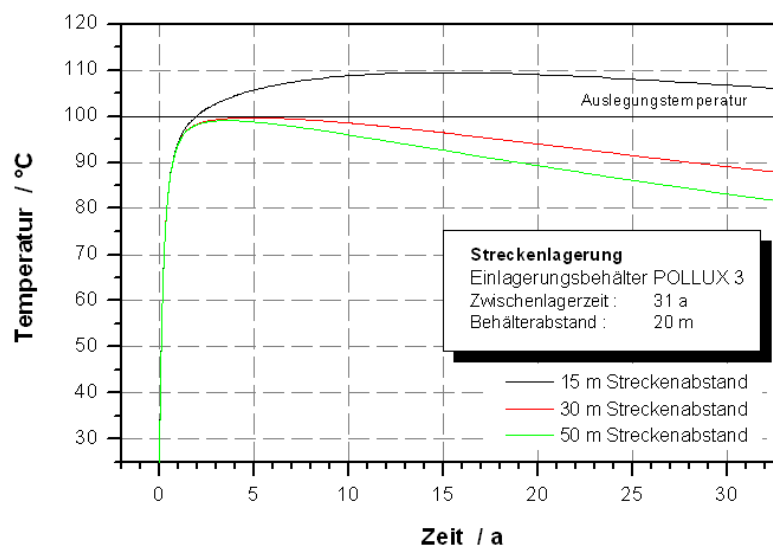


Abbildung 3-15: Temperatur-Zeit-Verlauf am heißesten Punkt für verschiedene Streckenabstände

Im Bentonitmantel des POLLUX-Behälters ist eine Abnahme der Temperatur festzustellen. Für einen Streckenabstand von 30 m mit einer Maximaltemperatur von 99,7 °C treten beispielsweise in 3,3 cm Entfernung vom Behälter 97,4 °C auf. In Abbildung 3-16 werden die Temperaturverläufe für ausgewählte Untersuchungspunkte innerhalb des Bentonites für einen Betrachtungszeitraum von 33 Jahren dargestellt.

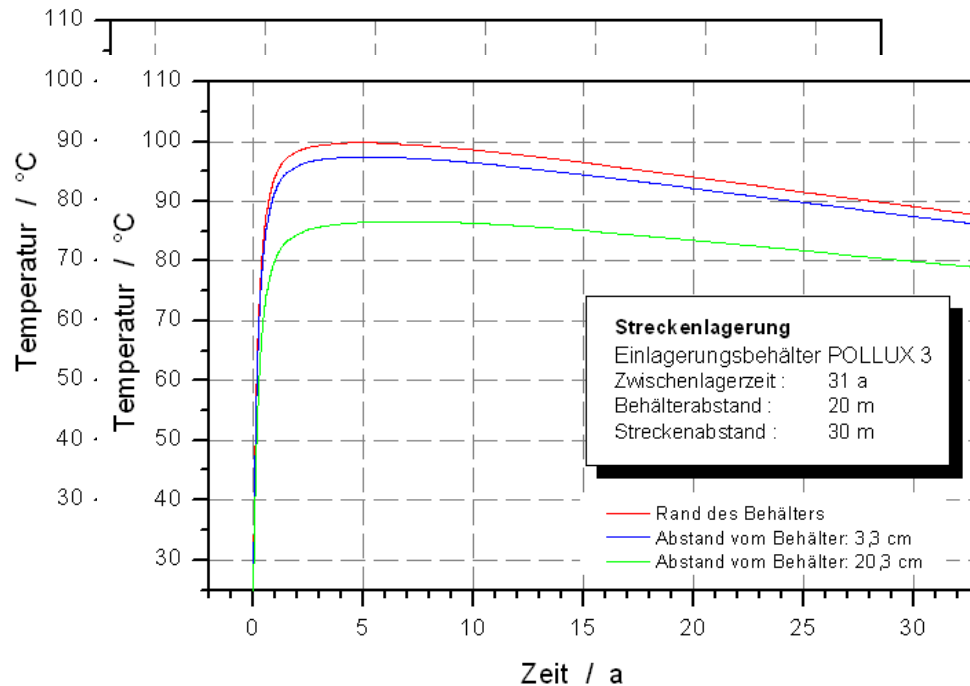


Abbildung 3-16: Temperatur-Zeit-Verläufe für verschiedene Entfernungen vom Behälter

3.2.3.7 Ermittlung der erforderlichen Feldesgröße

Auf Grundlage der vorangegangenen Untersuchungen können für die Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern unter Annahme der gewählten Einlagerungskonfiguration folgende geometrische Parameter angegeben werden, für die die Auslegungstemperatur (100 °C) bei einer Zwischenlagerzeit von 31 Jahren nicht überschritten wird:

- Behälterabstand $d = 20 \text{ m}$
- Streckenabstand $a_s = 30 \text{ m}$.

Die Fläche einer Einlagerungszelle (Behälter und umgebendes Wirtsgestein) ergibt sich zu:

$$A_0 = (d + l_{\text{Behälter}}) \cdot a_s$$

$$A_0 = (20 \text{ m} + 5,46 \text{ m}) \cdot 30 \text{ m} \approx 764 \text{ m}^2$$

Für die Einlagerung einer Abfallmenge von 8 947 tSM (gemäß des Abfallmengengerüsts) sind ca. 5 524 POLLUX-3 Endlagergebinde erforderlich. Der theoretische Flächenbedarf eines Einlagerungsfeldes kann daher mit $5\,524 \times 764 \text{ m}^2 \approx 4,2 \text{ km}^2$ abgeschätzt werden.

Größenbestimmend für ein reales Einlagerungsfeld sind bergbauliche und langzeitsicherheitliche sicherheitstechnische Anforderungen hinsichtlich notwendiger Sicherheitsabstände. Im ersten Entwurf getroffene Annahmen zu den Sicherheitsabständen sind bei Weiterverfolgung des Konzeptes zu verifizieren bzw. anzupassen. Zum Entwurf des ersten Konzeptes „Einlagerung von gezogenen Brennstäben ausgedienter Brennelemente in POLLUX-Behältern in Strecken“ wurde die im Folgenden beschriebene Startkonfiguration festgelegt.

Ausgehend vom geschätzten Durchmesser (1,20 m) eines POLLUX-3-Endlagerbehälters ist eine einhüllende Schale aus 30 cm dickem Bentonit vorgesehen. Auf die Sohle gelegte Betonfertigteile dienen als Fundament für ein schienengebundenes Einlagerungssystem (siehe Abbildung 3-17).

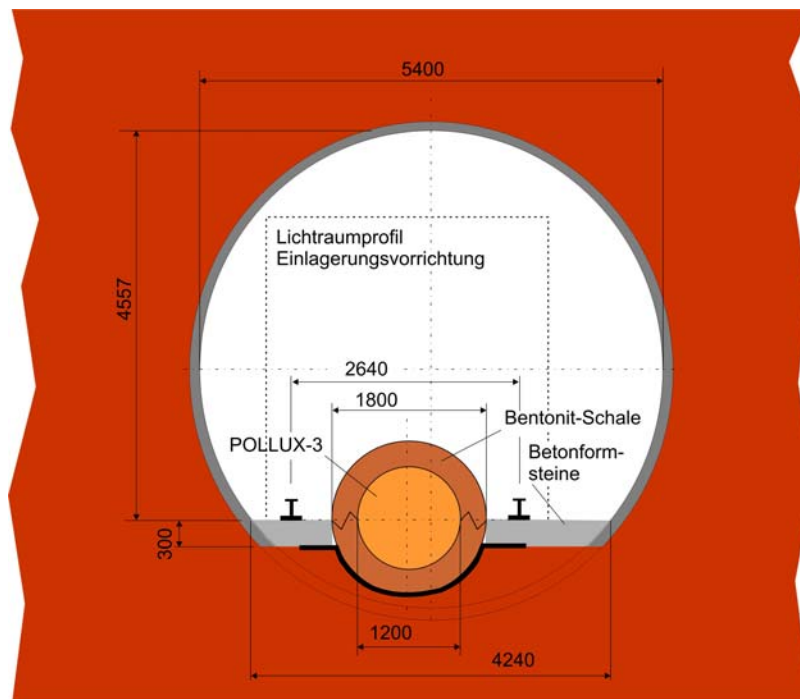


Abbildung 3-17: Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke für POLLUX-3

Nach der Einlagerung und dem Abdecken des POLLUX-3 durch formgepresste Bentonitfertigteile werden die Schienen und die Betonfertigteile entfernt und der Resthohlraum versetzt. Die Einlagerung erfolgt abschnittsweise in Rückbau vom Ende der ca. 200 m langen Tunnelstrecken aus (siehe Abbildung 3-18).

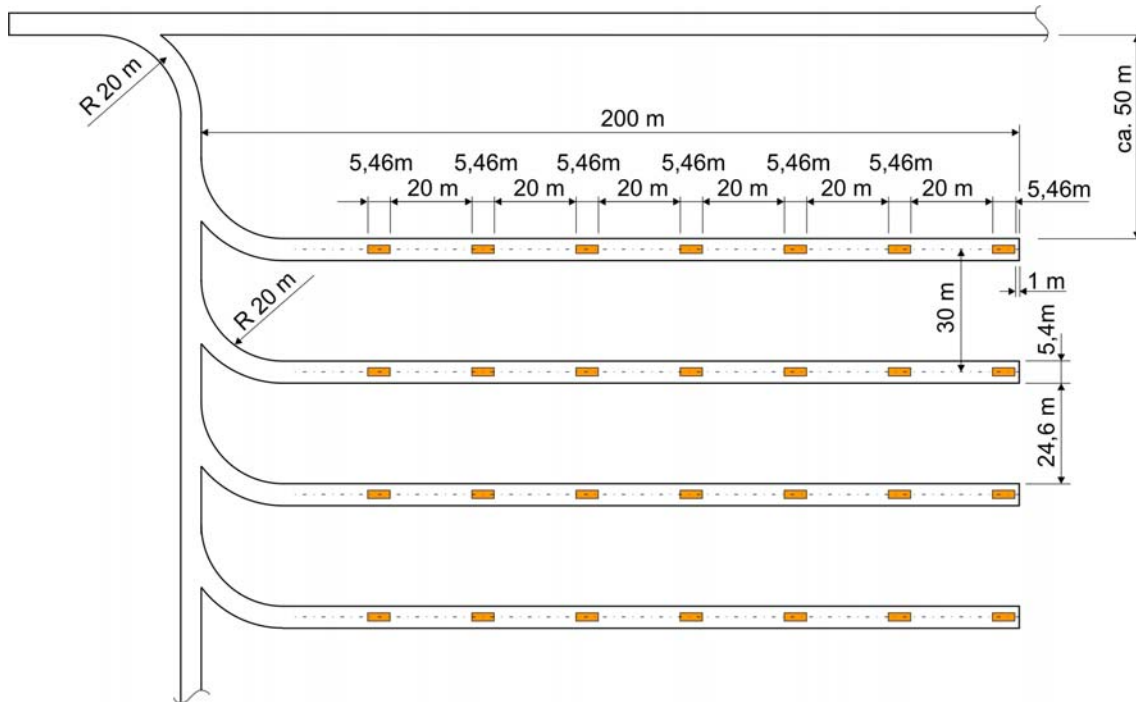


Abbildung 3-18: Transport- und Einlagerungsstrecken POLLUX-3

Ein Einzelfeld wurde im Entwurf als ein Feld mit 31 parallelen Einlagerungsstrecken definiert. Die Sicherheitsabstände zu den Richtstrecken wurden mit ca. 50 m angenommen. Die Annahme ist in weiterführenden Untersuchungen zu überprüfen. Der Abstand vom Einlagerungsstreckenende bis zum nächsten Querschlag wurde mit ca. 45 m angenommen. In Abbildung 3-19 ist ein theoretischer Gesamtendlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern im Ton dargestellt. Unter Berücksichtigung der Einzelfeldmaße und der bergbaulichen Gesichtspunkte ergeben sich ca. 6,8 km² erforderliche Fläche. Hierin wurde die Fläche für den Infrastrukturbereich nicht berücksichtigt.

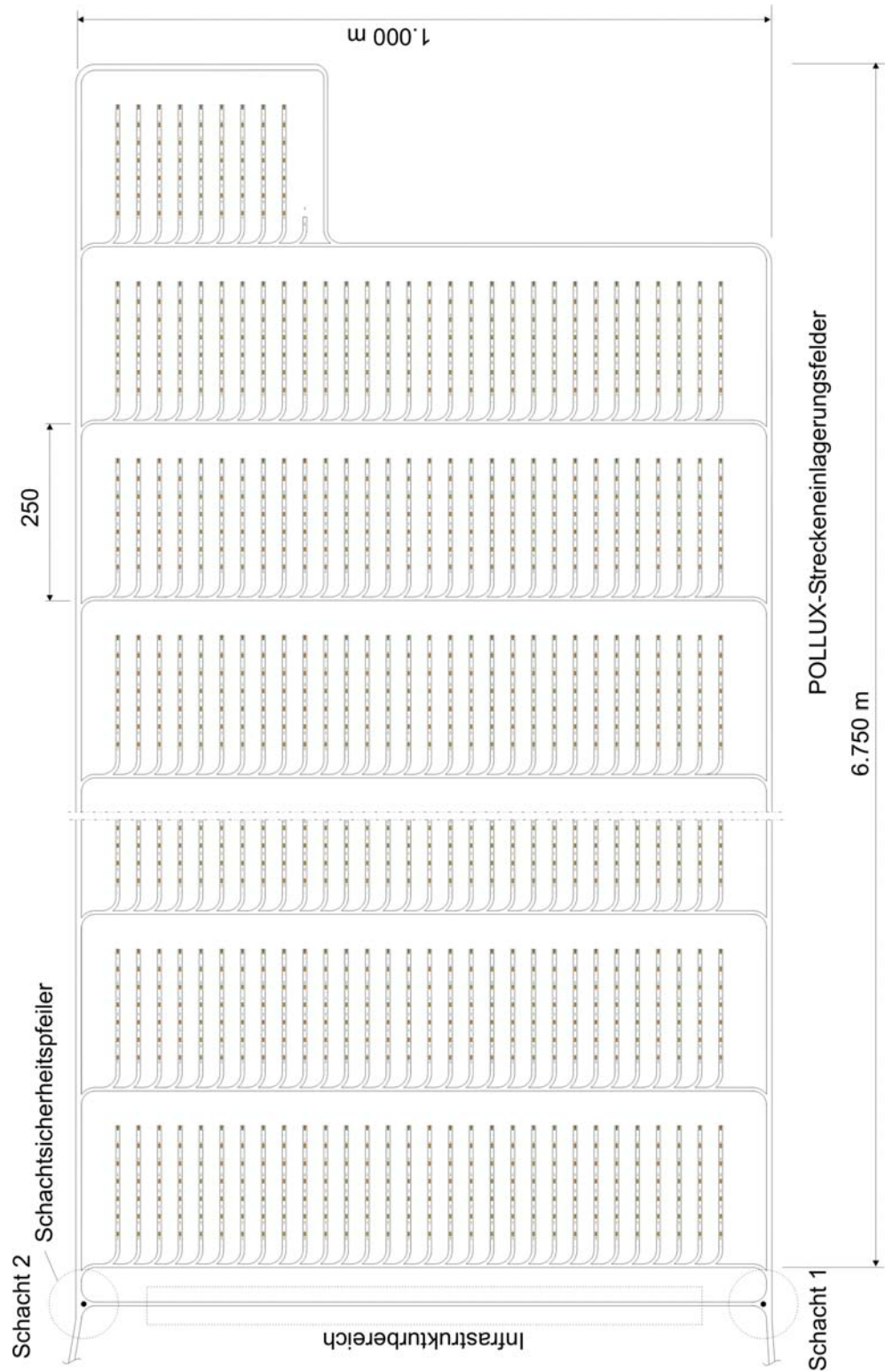


Abbildung 3-19: Endlager für POLLUX-3

3.2.4 Thermische Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen

Im Rahmen indikativer Berechnungen zur Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen im Tonstein wurden erste Abschätzungen zur

- minimalen Zwischenlagerzeit
- Anzahl und Abstand der Behälter in einem Bohrloch sowie zum
- notwendigen Abstand der Einlagerungsbohrlöcher

durchgeführt. Aus den so gewonnenen Parametern wurde der Flächenbedarf eines Endlagers im Tonstein unter Berücksichtigung einer minimalen Zwischenlagerzeit abgeschätzt.

Kriterium der Auslegung ist, dass im Bentonit, der als 30 cm starkes technisches Barrierematerial die Füllung des Bohrlochringraumes bildet, eine Auslegungstemperatur von 100 °C nicht überschritten werden soll, um die Integrität der Abdichtung zu gewährleisten.

Im Konzept der Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen wird die Länge der Einlagerungsbohrlöcher mit ca. 50 m inkl. Bohrlochverschluss und deren Durchmesser mit 1,03 m angenommen. Im Ringraum des Einlagerungsbohrloches zwischen Behälter und anstehendem Wirtsgestein befindet sich eine 30 cm breite Schicht aus Bentonit (Bentonitformsteine), welche als technische Barriere fungiert. Am Boden und am Kopf des Behälters ist ebenfalls eine derartige 30 cm starke Bentonitabdichtung vorgesehen, so dass eine allseitige Umschließung des Behälters mit 30 cm Bentonit gewährleistet ist. Aus handhabungstechnischen Gründen wird die 30 cm Bentonitschicht direkt auf den Behälter aufgebracht und durch eine äußere perforierte Stahlstruktur gehalten. Die Einheit aus Bentonit und HAW-Kokille wird eingelagert. Als Eingangswert für die Berechnungen werden die in Kap. 2.2.3.4 dargestellten Daten zur Wärmeleistung einer COGEMA-HAW-Kokille über die Zeit verwendet.

3.2.4.1 Auslegungsberechnungen - Berechnungsmethode - Modellgebiet

Die Temperaturfeldberechnungen wurden auch mit dem Programm FLAC 3D Version 2.1 durchgeführt /3-30/. Bei der Vernetzung der für die Berechnung verwendeten numerischen Modelle wurde auf eine ähnliche Netzdichte in Behälternahe geachtet. Die feinste Diskretisierung liegt auch hier für die verschiedenen Modelle am Übergang Behälter/Bentonit mit Knotenabständen von ca. 3 cm vor. In Abhängigkeit von den Abmessungen des Modellgebietes kamen numerische Modelle verschiedener Größe (kleine Modelle mit ca. 5 000 Zonen und ca. 6 200 Knoten; große Modelle mit

ca. 59 000 Zonen und ca. 58 000 Knoten) zum Einsatz. Abbildung 3-20 zeigt einen Ausschnitt eines numerischen Modells für den Teufenbereich – 483 m bis –525 m (linke Abbildung) sowie ein Detail der Vernetzung im Bereich der HAW-Kokille.

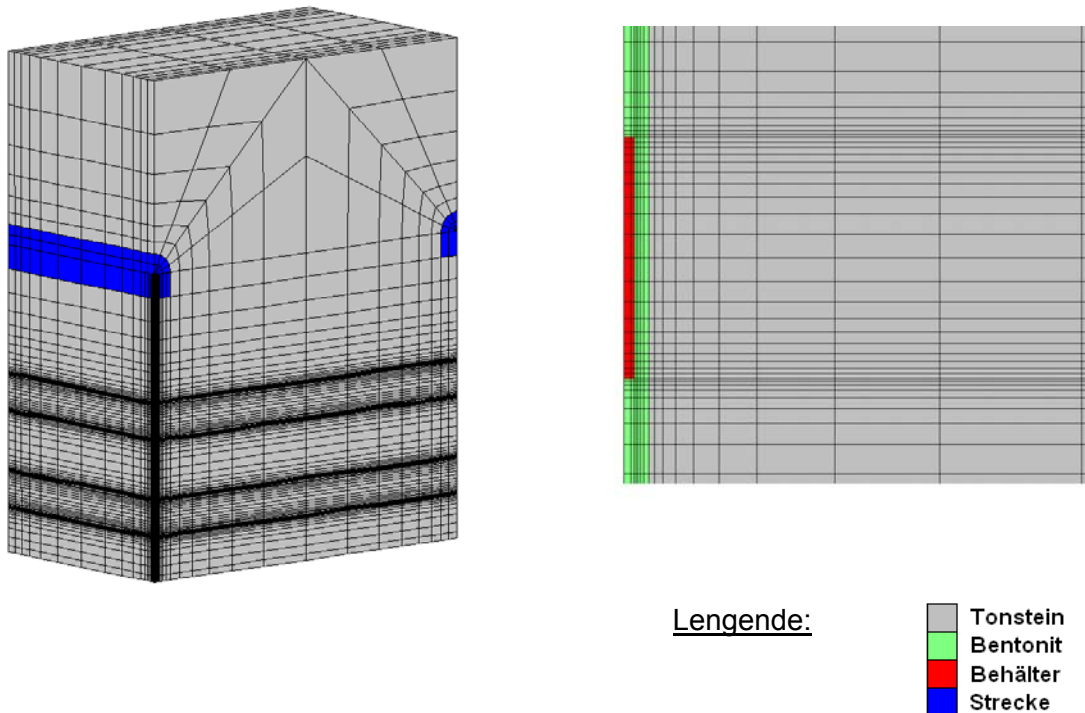


Abbildung 3-20: Darstellung der Diskretisierung des Modellgebietes (Ausschnitt)

linke Abb.: 3D-Blockdarstellung für den Teufenbereich
– 483 m bis –525 m

rechte Abb.: Detail der Vernetzung in Behälternähe

3.2.4.2 Modellbeschreibung - Geometrie des Modells/Modellgröße und Randbedingungen

Die Berechnungen erfolgten aus Gründen der Vereinfachung an einem Modellgebiet, welches als Ausschnitt einer hexagonalen Bohrlochanordnung repräsentativ für ein unendlich ausgedehntes Einlagerungsfeld im Tonstein steht. Die seitlichen Modellränder wurden in den Berechnungen als adiabat angenommen (kein Wärmetransport über die Ränder) und stellen somit Symmetrieebenen dar, welche diese Vereinfachung zulassen. Infolge der Symmetriebedingungen entsprechen daher Länge x Breite des Modells dem Streckenabstand x halbem Bohrlochabstand (Abbildung 3-21). Im Rahmen der Untersuchungen fand u.a. eine Variation dieser Modellparameter statt. Hierbei ist das einzige zu bestimmende Maß der Bohrlochabstand a_b . Der Streckenabstand a_s ergibt sich daraus zu $a_s = a_b \sin(\pi/3)$.

Das Wirtsgestein wurde von der Tagesoberfläche bis zu einer Teufe von 1 000 m modelliert und mit einem geothermischen Tiefengradienten von 3 K/100 m bei $T(z = 0 \text{ m}) = 8 \text{ °C}$ initialisiert. Weitere geologische Schichten wurden nicht modelliert.

Die Teufenlage des Grubengebäudes wurde mit 500 m, die Länge der Einlagerungsbohrlöcher mit ca. 50 m angenommen. In den Berechnungen wurde weiterhin vereinfachend angenommen, dass der vertikale Abstand zwischen den Behältern in einem Bohrloch sowie der Bohrlochverschluss ebenfalls aus Bentonit bestehen.

Weitere Details zu den Modellannahmen bezüglich Einlagerungskonfiguration sowie deren geometrische Abmessungen und Anordnung können Abbildung 3-21 entnommen werden.

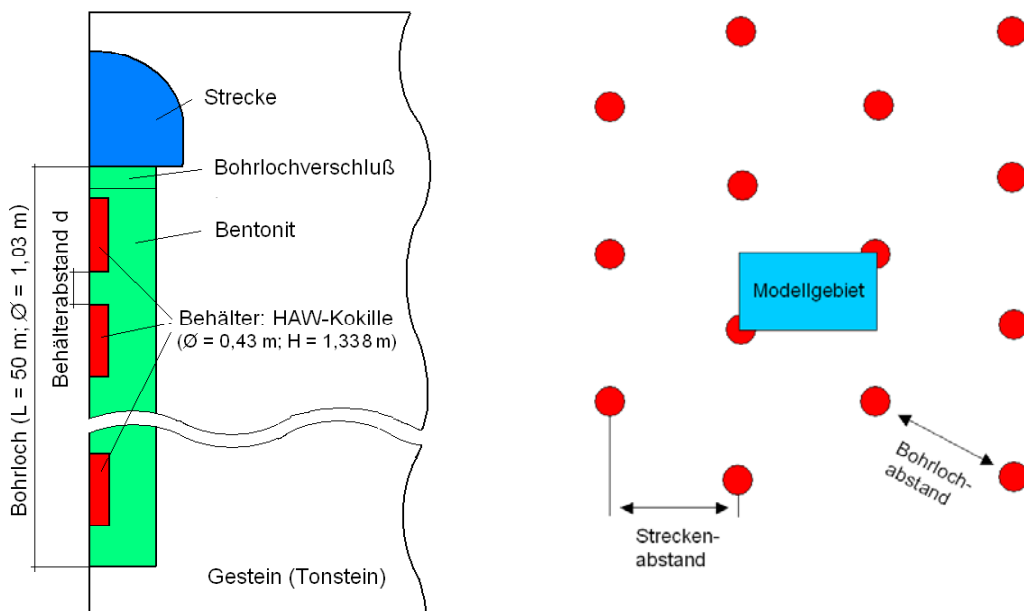


Abbildung 3-21: Modellannahme zur Einlagerungskonfiguration in Bohrlöchern sowie deren geometrische Anordnung (schematisch)

Es wurden auch hier dieselben Stoffgesetze und Materialparameter verwendet wie für den POLLUX-3-Behälter. Ebenso wurden für Tonstein und Bentonit dieselben Annahmen getroffen.

Wärmequelle

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde davon ausgegangen, dass im gesamten Feld HAW-Kokillen eingelagert werden. Die Wärmeleistung eines einzelnen Gebindes P wurde durch ein Pseudonuklidspektrum auf der Basis von fünf Nukliden P_i , $i=[1,5]$ approximiert. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tabelle 3-9 angegeben.

Abbildung 3-22 zeigt die Wärmeleistung eines Gebindes gemäß Tabelle 3-9 bzw. die der einzelnen Pseudonuklide und deren Summe als Gesamtleistung P als Funktion der Zeit.

$$P = \sum_{i=1}^5 p_i \cdot e^{-\eta_i t}$$

wobei p_i „nuklidspezifische“ Anfangswärmeleistung [W]
 t Zeit [s]
 η_i „nuklidspezifische“ Aktivität [s⁻¹] mit $\eta_i = \ln 2 / t_i$
 t_i „nuklidspezifische“ Halbwertszeit [s]

HAW-Kokille	Pseudonuklid i				
	1	2	3	4	5
spez. Wärmeleistung p_i [W]	2679,9997	1095,0031	21,6583	0,8285	$8,5728 \cdot 10^{-2}$
spez. Aktivität η_i [s ⁻¹]	$6,3732 \cdot 10^{-9}$	$6,0577 \cdot 10^{-10}$	$6,0475 \cdot 10^{-10}$	$6,0595 \cdot 10^{-10}$	$2,6176 \cdot 10^{-10}$

Tabelle 3-9: Pseudonuklidspektrum der HAW-Kokille

Für das Modell wurde keine Annahme über die Verteilung des radioaktiven Materials im Behälter getroffen, sondern der gesamte Behälter wurde aufgrund seiner signifikant höheren Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem ihn umgebenden Wirtsgestein als Wärmequelle angenommen.

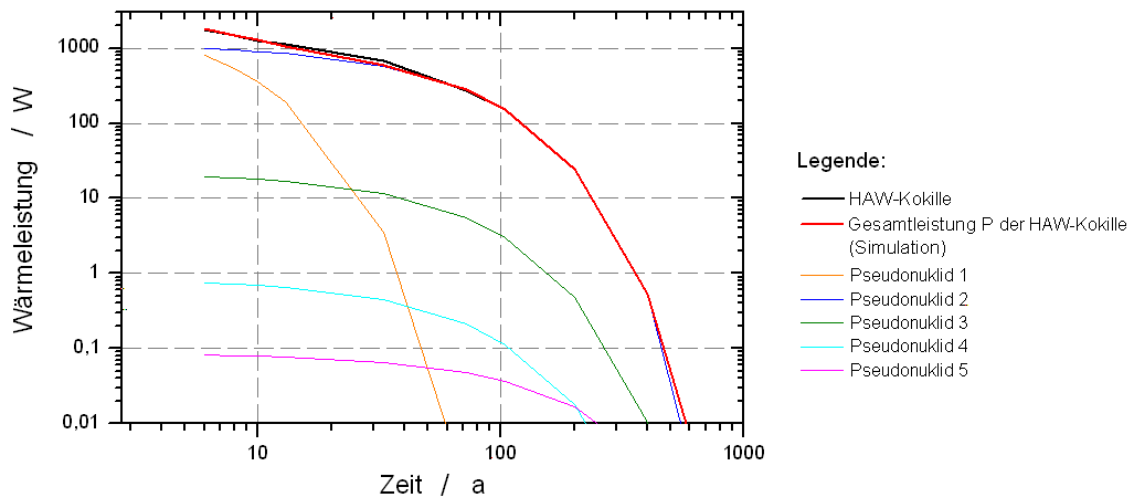


Abbildung 3-22: Wärmeleistung einer HAW-Kokille bzw. der einzelnen Pseudonuklide

3.2.4.3 Ermittlung der Zwischenlagerzeit

In der ersten Untersuchungsphase erfolgte die Ermittlung der minimalen Zwischenlagerzeit. Die Untersuchungen wurden an einem numerischen Modell bei Simulation von lediglich einer HAW-Kokille durchgeführt. Die Lage der Modellgrenzen (Länge x Breite: 75 m x 75 m) wurde hierbei so gewählt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums von 5 Jahren thermische Randeffekte vernachlässigt werden können. Unter den gewählten Randbedingungen wird durch das Modell ein einzelner Behälter in einem unendlich ausgedehnten Einlagerungsbereich simuliert.

In Abbildung 3-23 sind für 3 unterschiedliche Zwischenlagerzeiten die sich am Übergang Behälter /Bentonit einstellenden Maximaltemperaturen aufgetragen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Auslegungstemperatur von 100 °C für eine Zwischenlagerzeit von ca. ≥ 40 a nicht überschritten wird.

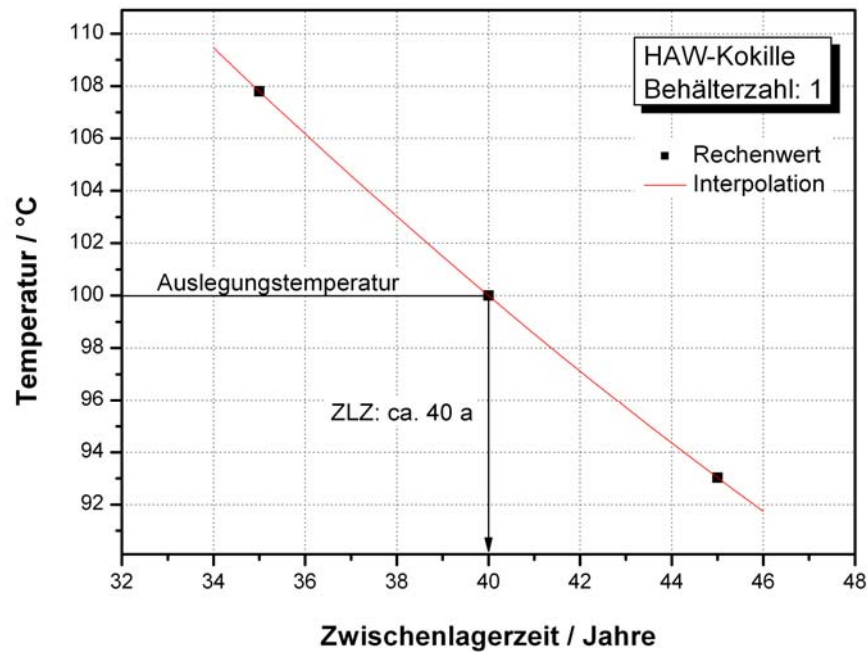


Abbildung 3-23: Maximaltemperatur am heißesten Punkt als Funktion der Zwischenlagerzeit

3.2.4.4 Ermittlung des Behälterabstandes d

In der zweiten Untersuchungsphase wurden die Behälterabstände innerhalb eines Bohrloches variiert. Die Berechnungen erfolgten an einem Modell mit 3 HAW-Kokillen in einem Bohrloch für eine Zwischenlagerzeit von 40 a. Die Berechnungen erfolgten unter Ansatz eines numerischen Modells mit ausreichenden Abmessungen (Länge x Breite: 75 m x 75 m), sodass thermische Randeffekte innerhalb des Betrachtungszeitraumes vernachlässigt werden können.

Für die Auswertung der durchgeführten Berechnungsfälle wurden 2 Behälterniveaus ausgewählt, und die sich in diesen Niveaus einstellenden Maximaltemperaturen miteinander verglichen. Hierbei zeigte sich für vertikale Behälterabstände $d < 6$ m ein deutlicher Überlagerungseffekt im resultierenden Temperaturfeld, wobei die maximalen Temperaturen für die verschiedenen Behälterniveaus sowohl stark voneinander differierten als auch deutlich über der Auslegungstemperatur lagen. Für vertikale Behälterabstände $d \geq 6$ m konnten wesentlich geringere Temperaturunterschiede zwischen den Behälterniveaus mit $\Delta T < \text{ca. } 0,8$ K beobachtet werden, wobei die Maximaltemperaturen der einzelnen Behälterniveaus im Bereich der Auslegungstemperatur lagen. Die weiteren Berechnungen erfolgten mit einem Behälterabstand $d = 6$ m und einer Behälteranzahl von 7 HAW-Kokillen pro Bohrloch.

3.2.4.5 Ermittlung des Bohrlochabstandes a_b

Auf Basis der vorherigen Untersuchungsergebnisse (Zwischenlagerzeit: 40 a, Behälterabstand $d = 6$ m, 7 HAW-Kokillen pro Bohrloch) erfolgte in Phase 3 eine Variation des Bohrlochabstandes. Die Ergebnisse zeigen bei geringer werdendem Bohrlochabstand eine exponentielle Zunahme der maximalen Temperatur (Abbildung 3-24). Durch die Überlagerung der Temperaturfelder eng benachbarter Bohrlöcher kommt es zu einer Abnahme des Temperaturgradienten, und somit zu einer Behinderung der Wärmeausbreitung. Infolge dieses Wärmestaus steigt die Temperatur für geringer werdende Abstände der Einlagerungsbohrlöcher überproportional an.

Für alle Berechnungsfälle stellt sich die maximale Temperatur am Übergang Behälter/Bentonit an der mittleren von 7 HAW-Kokillen ein.

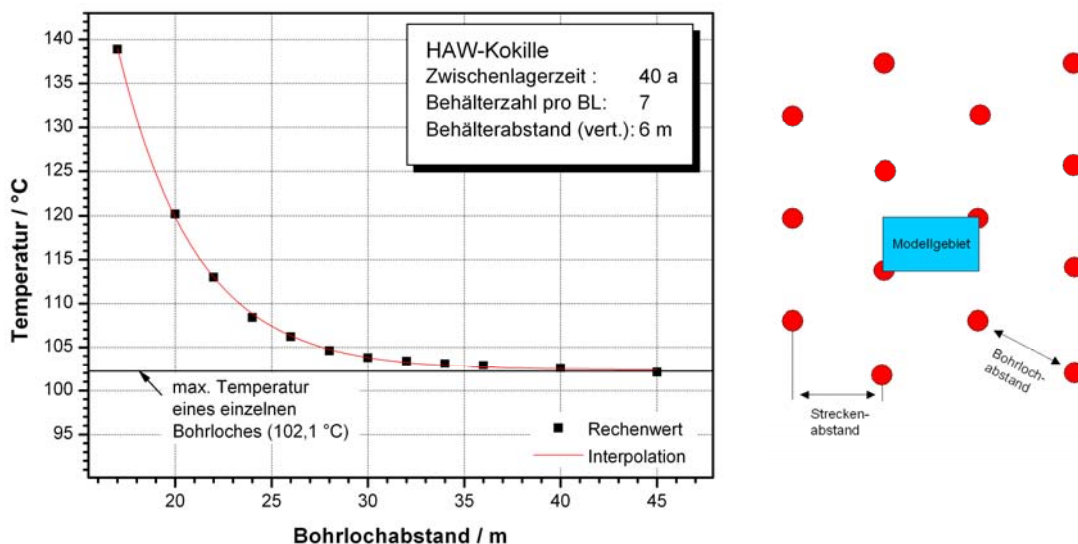


Abbildung 3-24: Maximaltemperatur am heißesten Punkt in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand a_b

Abbildung 3-25 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe am heißesten Punkt des Modells für verschiedene ausgewählte Bohrlochabstände innerhalb eines Betrachtungszeitraumes von 30 Jahren. Der Zeitpunkt des Erreichens der Maximaltemperatur ist ebenfalls deutlich vom Bohrlochabstand abhängig und steigt für engere Bohrlochrastrer stark an. Für Bohrlochabstände $a_s \geq 30$ m werden die Temperaturmaxima innerhalb von ca. 4 Jahren überschritten. Für diese Anordnungen bleiben die Maximaltemperaturen unterhalb 104 °C, wobei die Temperaturdifferenz zum Referenz-Berechnungsfall eines einzelnen Bohrloches mit 4 Behältern ($T_{\max} = 102,1$ °C) weniger als 2 K beträgt.

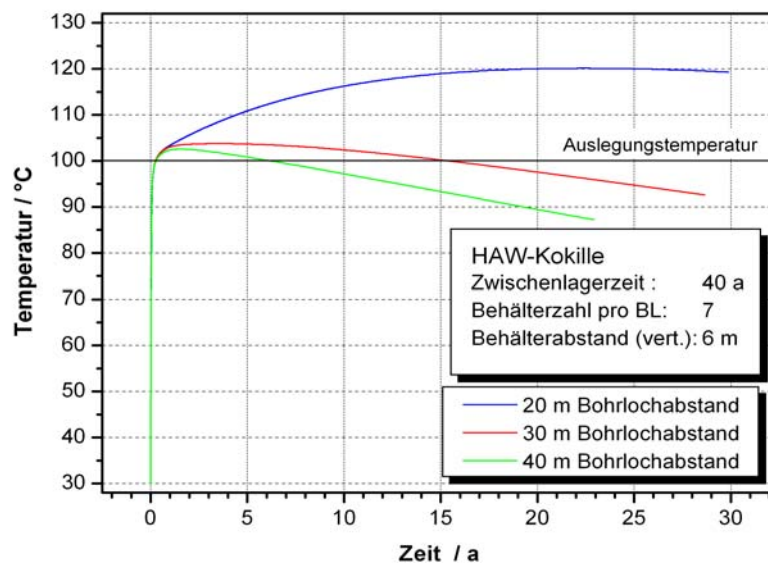


Abbildung 3-25: Temperatur–Zeit-Verlauf am heißesten Punkt für verschiedene Bohrlochabstände

Im bentonitgefüllten Ringraum des Einlagerungsbohrloches ist eine exponentielle Abnahme der Temperatur festzustellen. Für einen Bohrlochabstand von 30 m mit einer Maximaltemperatur von 103,8 °C treten beispielsweise zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums in 2,8 cm Entfernung von der Behälteroberfläche 97,4°C auf. In Abbildung 3-26 werden die Temperaturverläufe für ausgewählte Untersuchungspunkte innerhalb des Bentonites für einen Betrachtungszeitraum von ca. 30 Jahren dargestellt.

Die Abweichungen von der Auslegungstemperatur erschienen für diese ersten indikativen Berechnungen zur orientierenden Gegenüberstellung mit dem Salzkonzept akzeptabel. Für den gewählten Bohrlochabstand $a_b = 30$ m lässt sich ein Streckenabstand von ca. 26,0 m ermitteln.

3.2.4.6 Ermittlung der erforderlichen Feldesgröße

Auf Grundlage der vorangegangenen Untersuchungen können für die Bohrlochlage- rung von HAW-Kokillen unter Annahme der gewählten Einlagerungskonfiguration folgende geometrische Parameter angegeben werden

- Behälterabstand $d = 6$ m bei 7 Behältern pro Bohrloch
- Bohrlochabstand $a_b = 30$ m bzw. Streckenabstand $a_s = 26,0$ m.

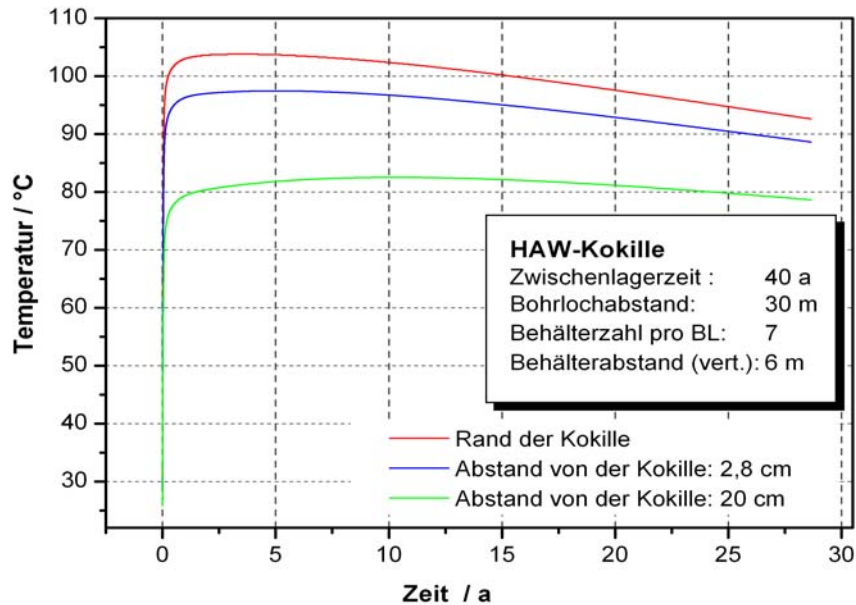


Abbildung 3-26: Temperatur–Zeit–Verläufe für verschiedene Entfernungen von der Kokille

Die Fläche einer Einlagerungszelle (ein Bohrloch und umgebendes Wirtsgestein) ergibt sich zu:

$$A_0 = a_b \cdot a_s$$

$$A_0 = 30 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ m} = 780 \text{ m}^2$$

Für die Einlagerung einer Abfallmenge von 4 778 HAW-Kokillen sind somit 683 Einlagerungsbohrlöcher erforderlich. Der erforderliche Flächenbedarf eines Einlagerungsfeldes kann daher mit $683 \cdot 780 \text{ m}^2 \approx 0,53 \text{ km}^2$ abgeschätzt werden.

Größenbestimmend für ein reales Einlagerungsfeld sind auch hier bergbauliche und langzeitliche sicherheitstechnische Anforderungen hinsichtlich notwendiger Sicherheitsabstände. Im ersten Entwurf getroffene Annahmen zu den Sicherheitsabständen sind bei Weiterverfolgung des Konzeptes zu verifizieren bzw. anzupassen. Zum Entwurf des Konzeptes „Einlagerung von HAW-Kokillen in Bohrlöchern“ wurde die im Folgenden beschriebene Startkonfiguration festgelegt.

Ausgehend vom Durchmesser einer HAW-Kokille ist auch hier eine einhüllende Schale aus 30 cm dickem Bentonit vorgesehen. Auf die Sohle gelegte Betonfertigteile dienen als Fundament für ein schienengebundenes Einlagerungssystem (siehe Abbildung 3-27).

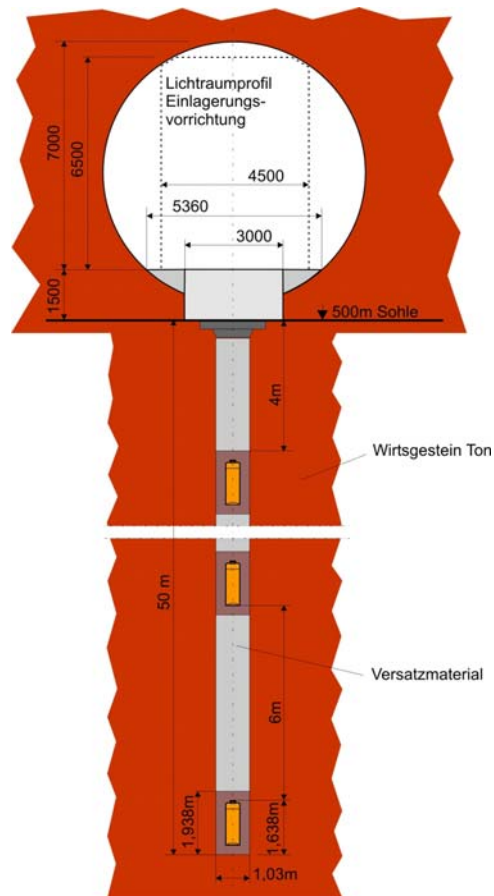


Abbildung 3-27: Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für HAW-Kokillen

Der Einlagerungsvorgang für die Bohrlochlagerung ist im Folgenden, hinsichtlich seiner Abläufe in der Bohrlochbeschickungsstrecke, beschrieben.

- Fahrt der untertägigen Lok mit beladenem Plateauwagen in die Einlagerungsstrecke
- Positionieren des beladenen Plateauwagens in der Einlagerungsposition
- Übergabe des Transferbehälters an die Einlagerungsvorrichtung
- Aufrichten des Transferbehälters und Absetzen auf Bohrlochsleuse
- Abschirmhaube auf den Transferbehälter setzen
- Öffnen des Transferbehälters
- Anschlagen des Seiles mit Greifer
- Endlagerbehälter in das Bohrloch absenken
- Verschließen des Bohrloches

- Auswechseln des Transferbehälters gegen einen Versatzbehälter
- Einbringen von Versatzmaterial in das Bohrloch
- Abschirmhaube abnehmen
- Rücktransport des leeren Transferbehälters zum Schacht und zum Funktionsbereich Bereitstellung und Wartung in der Umladestation

Ein Einzelfeld (Abbildung 3-28) wurde im Entwurf als ein Feld mit 36 parallelen Einlagerungsstrecken definiert. Die zu überprüfenden Sicherheitsabstände zu den Richtstrecken wurden mit ca. 50 m angenommen. Der Abstand vom Einlagerungsstrecke-nende bis zum nächsten Querschlag wurde mit ca. 34 m angenommen.

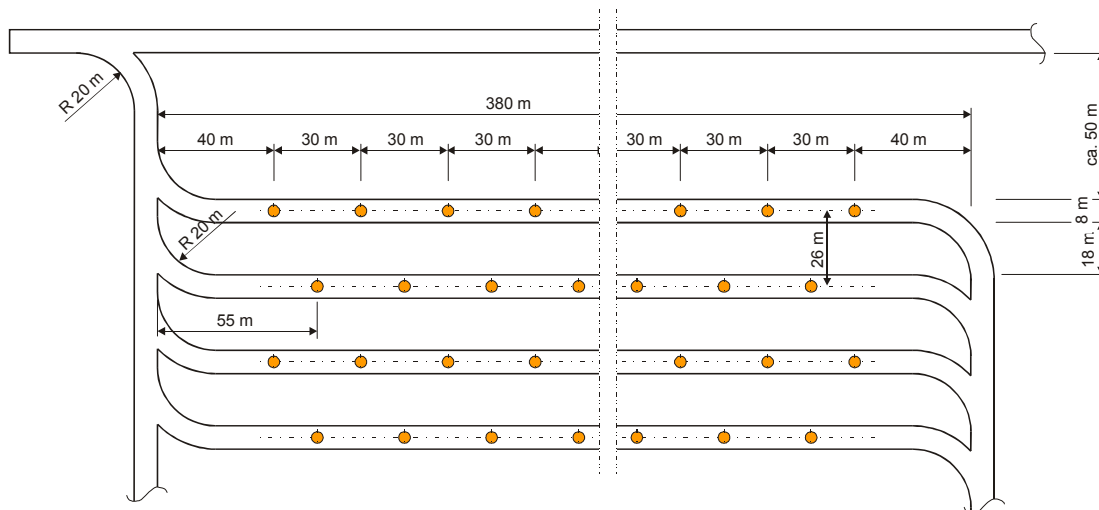


Abbildung 3-28: Bohrlochbeschickungsstrecken für HAW

In Abbildung 3-29 ist ein theoretischer Gesamtendlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen im Ton dargestellt. Unter Berücksichtigung der Einzelfeldmaße und der bergbaulichen Gesichtspunkte ergeben sich ca. 0,9 km² erforderliche Fläche. Hierin wurde wiederum die erforderliche Fläche für den Infrastrukturbereich nicht berücksichtigt.

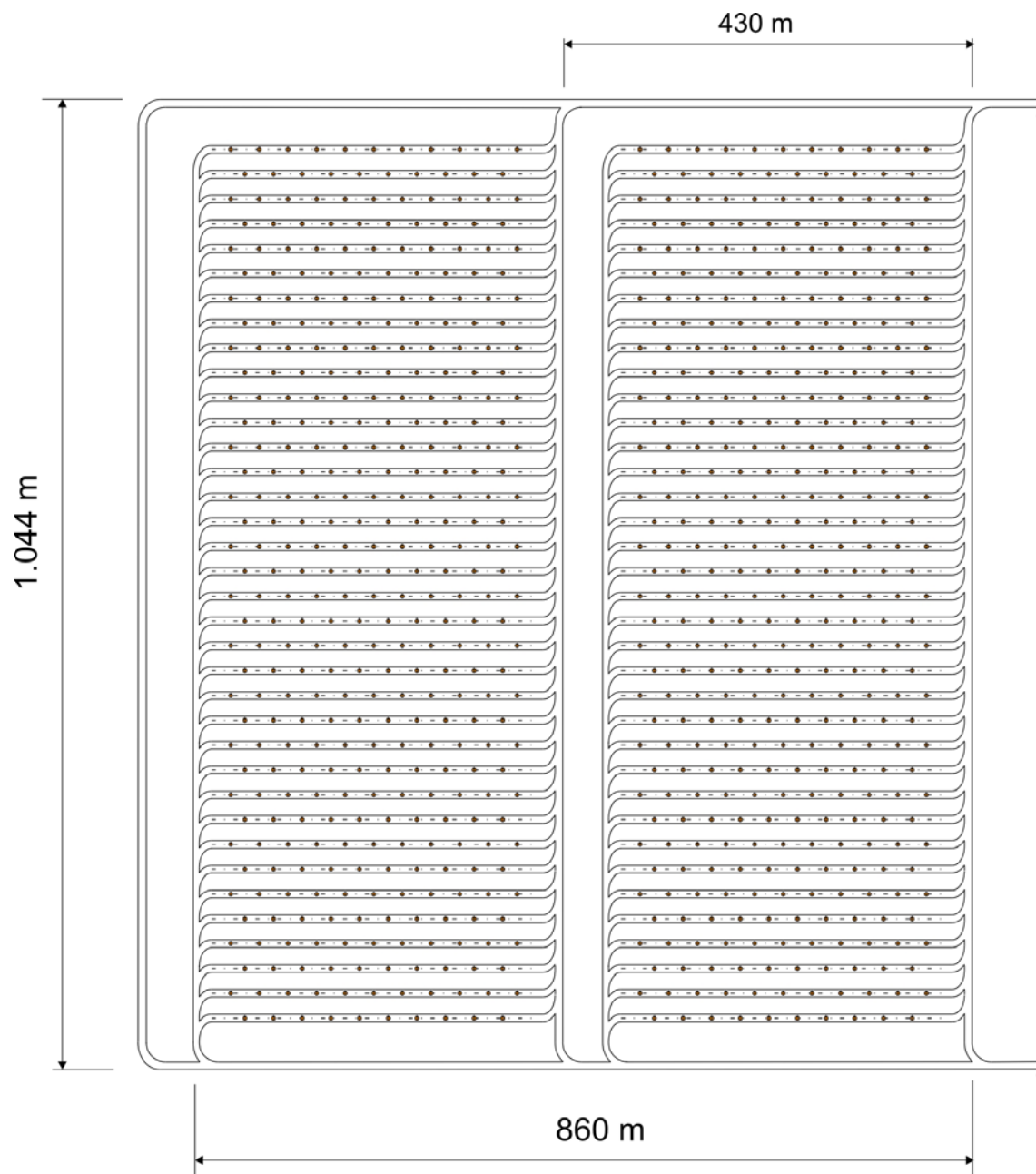


Abbildung 3-29: Einlagerungsbereich für HAW-Kokillen

3.2.5 Thermische Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)

Im Rahmen indikativer Berechnungen zur Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen im Tonstein wurden wie bei den HAW-Kokillen erste Abschätzungen zur

- minimalen Zwischenlagerzeit in Abhängigkeit von der Beladung der Endlagerbehälter
- Anzahl und Abstand der Behälter in einem Bohrloch sowie zum
- notwendigen Abstand der Einlagerungsbohrlöcher

durchgeführt. Aus den so gewonnenen Parametern konnte der Flächenbedarf eines Endlagers im Tonstein unter Berücksichtigung einer minimalen Zwischenlagerzeit abgeschätzt werden.

Kriterium der Auslegung ist auch hier, dass im Bentonit, der als 30 cm starkes technisches Barrierematerial die Füllung des Bohrlochringraumes bildet, eine Auslegungstemperatur von 100 °C nicht überschritten werden soll, um die Integrität der Abdichtung zu gewährleisten.

Im Konzept der Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen wird die Länge der Einlagerungsbohrlöcher mit ca. 50 m zzgl. Bohrlochverschluss und deren Durchmesser mit 1,03 m angenommen. Im Ringraum des Einlagerungsbohrloches zwischen Behälter und anstehendem Wirtsgestein befindet sich eine 30 cm breite Abdichtung aus Bentonit (Bentonitformsteine), welche als technische Barriere fungiert. Am Boden und am Kopf des Behälters ist ebenfalls eine derartige 30 cm starke Bentonitabdichtung vorgesehen, so dass eine allseitige Umschließung des Behälters mit 30 cm Bentonit gewährleistet ist. Aus handhabungstechnischen Gründen wird die 30 cm Bentonitschicht direkt auf den Behälter aufgebracht und durch eine äußere perforierte Stahlstruktur gehalten. Die Einheit aus Bentonit und BSK wird eingelagert.

3.2.5.1 Wärmeleistung der Brennstab-Kokille über die Zeit

In Tabelle 3-10 sind die Wärmeleistungen für den Endlagerbehälter BSK 3 (Brennstabkokille beladen mit Stäben aus drei Brennelementen/1,6 tSM) sowie für einen Endlagerbehälter BSK 2 (Brennstabkokille beladen mit Stäben aus zwei Brennelementen/1,1 tSM) auf Basis des Referenz-Brennelementes dargestellt.

Zeit in a	Wärmeleistung der Brennstab- kokille BSK 3 (1,6 tSM) in W	Wärmeleistung der Brennstab- kokille BSK 2 (1,1 tSM) in W
1	21 220	14 147
2	11 840	7 893
5	4 700	3 133
6	3 650	2 433
10	3 030	2 020
15	2 580	1 720
20	2 320	1 547
30	1 930	1 287
40	1 620	1 080
50	1 390	927
70	1 050	700
100	760	507
120	640	427
150	520	347
200	420	280
500	230	153
1 000	130	87
10 000	30	20
100 000	0,1	0,07
1 000 000	0,01	0,007

Tabelle 3-10: Wärmeleistung der Endlagerbehälter BSK 3 und BSK 2 über die Zeit für Uran-DWR-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U₂₃₅ Anreicherung

3.2.5.2 Auslegungsberechnungen – Berechnungsmethode - Modellgebiet

Die Temperaturfeldberechnungen wurden auch mit dem Programm FLAC 3D Version 2.1 durchgeführt /3-30/. Bei der Vernetzung der für die Berechnung verwendeten numerischen Modelle wurde auf eine ähnliche Netzdichte in Behälternahe geachtet. Die feinste Diskretisierung liegt für die verschiedenen Modelle am Übergang Behälter/Bentonit mit Knotenabständen von ca. 3 cm vor. In Abhängigkeit von den Abmessungen des Modellgebietes kamen numerische Modelle verschiedener Größe (kleine Modelle mit ca. 6 800 Zonen und ca. 8 400 Knoten; große Modelle mit ca. 53 000 Zonen und ca. 62 000 Knoten) zum Einsatz. Abbildung 3-30 zeigt einen Ausschnitt eines numerischen Modells für den Teufenbereich -470 m bis -538 m (linke Abbildung) sowie ein Detail der Vernetzung im Bereich der Brennstabkokille.

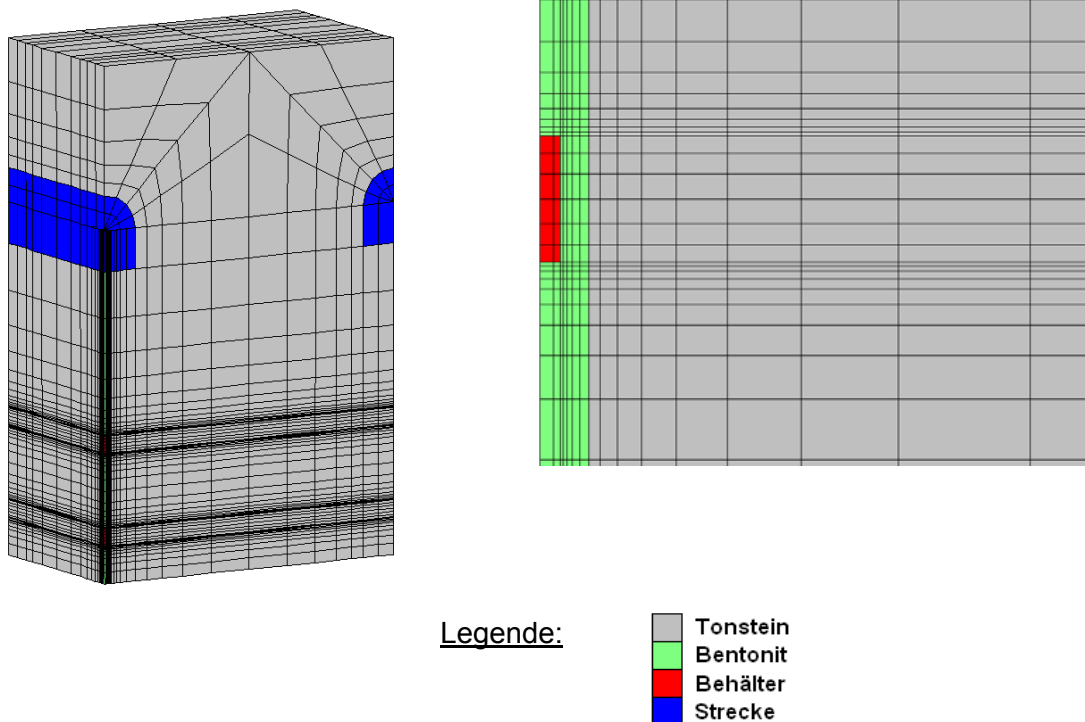


Abbildung 3-30: Darstellung der Diskretisierung des Modellgebietes (Ausschnitt)
linke Abb.: 3D-Blockdarstellung des Teufenbereiches
-483 bis -525 m
rechte Abb.: Detail der Vernetzung in Behälternähe

3.2.5.3 Modellbeschreibung - Geometrie des Modells/Modellgröße und Randbedingungen

Die Berechnungen erfolgten aus Gründen der Vereinfachung an einem Modellgebiet, welches als Ausschnitt einer hexagonalen Bohrlochanordnung repräsentativ für ein unendlich ausgedehntes Einlagerungsfeld im Tonstein steht. Die seitlichen Modellränder wurden in den Berechnungen als adiabat angenommen (kein Wärmetransport über die Ränder) und stellen somit Symmetrieebenen dar, welche diese Vereinfachung zulassen. Infolge der Symmetriebedingungen entsprechen daher Länge x Breite des Modells dem Streckenabstand x halbem Bohrlochabstand (Abbildung 3-31). Im Rahmen der Untersuchungen fand u.a. eine Variation dieser Modellparameter statt. Hierbei ist das einzige zu bestimmende Maß der Bohrlochabstand a_b . Der Streckenabstand a_s ergibt sich daraus zu $a_s = a_b \sin(\pi/3)$.

Das Wirtsgestein wurde von der Tagesoberfläche bis zu einer Teufe von 1 000 m modelliert und mit einem geothermischen Tiefengradienten von 3 K/100 m bei $T(z = 0 \text{ m}) = 8^\circ\text{C}$ initialisiert. Weitere geologische Schichten wurden nicht modelliert. Die Teufenlage des Grubengebäudes wurde mit 500 m und die Länge der Einlagerungsbohrlöcher mit ca. 50 m angenommen. In den Berechnungen wurde weiterhin

vereinfachend angenommen, dass der vertikale Abstand zwischen den Behältern in einem Bohrloch, sowie der Bohrlochverschluss ebenfalls aus Bentonit bestehen.

Weitere Details zu den Modellannahmen bezüglich Einlagerungskonfiguration sowie deren geometrische Abmessungen und Anordnung können Abbildung 3-31 entnommen werden.

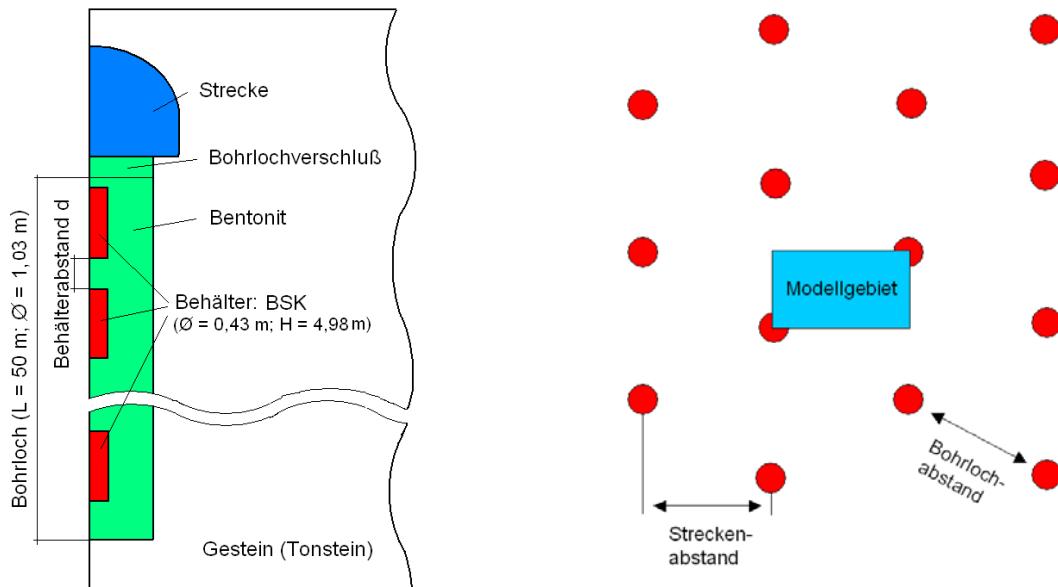


Abbildung 3-31: Modellannahme zur Einlagerungskonfiguration in Bohrlöchern sowie deren geometrische Anordnung (schematisch)

Im Rahmen der Untersuchungen wurde von einer instantanen Einlagerung der Behälter ausgegangen. Eine zeitliche gestaffelte Einlagerung wurde nicht berücksichtigt.

Ein Transport der Wärme über Grundwasserströmungen wurde vernachlässigt. Es wurden dieselben Stoffgesetze und Materialparameter verwendet wie für den POLLUX-3-Behälter. Ebenso wurden für Tonstein und Bentonit dieselben Annahmen getroffen wie in den vorangegangenen zwei Fällen.

Wärmequelle

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde davon ausgegangen, dass im gesamten Feld Brennstabkockillen eingelagert werden. Die Wärmeleistung eines einzelnen Gebindes P wurde durch ein Pseudonuklidspektrum auf der Basis von fünf Nukliden P_i , $i=[1,5]$ approximiert. Die entsprechenden Zahlenwerte für die BSK 3 und BSK 2 sind in Tabelle 3-11 angegeben.

Abbildung 3-32 und Abbildung 3-33 zeigen die Wärmeleistung eines BSK 3 bzw. BSK 2 Gebindes gemäß Tabelle 3-11 sowie die der einzelnen Pseudonuklide und deren Summe als Gesamtleistung P als Funktion der Zeit.

$$P = \sum_{i=1}^5 p_i \cdot e^{-\eta_i t}$$

wobei p_i „nuklidspezifische“ Anfangswärmeleistung [W]

t Zeit [s]

η_i „nuklidspezifische“ Aktivität [s⁻¹] mit $\eta_i = \ln 2 / t_i$

t_i „nuklidspezifische“ Halbwertszeit [s]

Brennstabkokille BSK 3	Pseudonuklid i				
	1	2	3	4	5
spez. Wärmeleistung p_i [W]	3 026 400	28 643	3 445,4	2 782,5	537,62
spez. Aktivität η_i [s ⁻¹]	$2,397 \cdot 10^{-7}$	$2,331 \cdot 10^{-8}$	$8,11 \cdot 10^{-9}$	$7,169 \cdot 10^{-10}$	$4,917 \cdot 10^{-11}$
Brennstabkokille BSK 2					
spez. Wärmeleistung p_i [W]	2 017 600	19 095	2 297	1 855	358,4
spez. Aktivität η_i [s ⁻¹]	$2,397 \cdot 10^{-7}$	$2,331 \cdot 10^{-8}$	$8,11 \cdot 10^{-9}$	$7,169 \cdot 10^{-10}$	$4,917 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 3-11: Pseudonuklidspektrum der Brennstabkokillen BSK 3 und BSK 2

Für das Modell wurde keine Annahme über die Verteilung des radioaktiven Materials im Behälter getroffen, sondern der gesamte Behälter wurde aufgrund seiner signifikant höheren Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem ihn umgebenden Wirtsgestein als Wärmequelle angenommen.

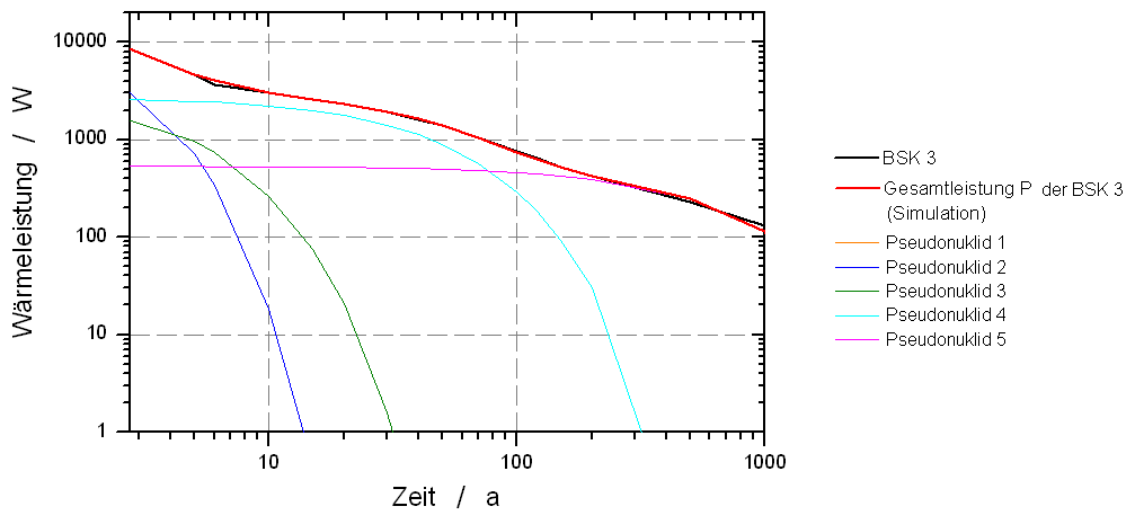


Abbildung 3-32: Wärmeleistung der Brennstabkokille bzw. der einzelnen Pseudonuklide

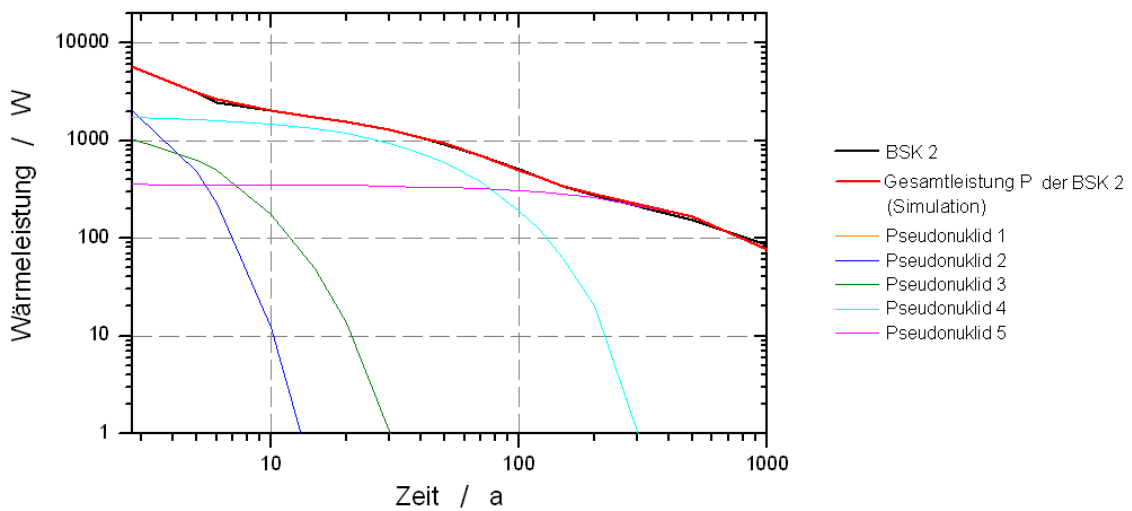


Abbildung 3-33: Wärmeleistung der Brennstabkokille BSK 2 bzw. der einzelnen Pseudonuklide

3.2.5.4 Ermittlung der Zwischenlagerzeit

In der ersten Untersuchungsphase erfolgte die Ermittlung der minimalen Zwischenlagerzeit. Die Untersuchungen wurden an einem numerischen Modell bei Simulation von lediglich einer Brennstabkockille durchgeführt. Die Lage der Modellgrenzen (Länge x Breite: 75 m x 75 m) wurde hierbei so gewählt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums von 5 Jahren thermische Randeffekte vernachlässigt werden können. Unter den gewählten Randbedingungen wird durch das Modell ein einzelner Behälter in einem unendlich ausgedehnten Einlagerungsbereich simuliert.

In Abbildung 3-34 sind für unterschiedliche Zwischenlagerzeiten der untersuchten Endlagergebinde die sich am Übergang Behälter / Bentonit einstellenden Maximaltemperaturen aufgetragen. Die Untersuchungen zeigen, dass bei voller Beladung des Behälters (BSK 3) die Auslegungstemperatur von 100 °C erst nach einer Zwischenlagerzeit von ca. 57 a nicht mehr überschritten wird. Für die Annahme einer reduzierten Beladung (BSK 2) beträgt die minimale Zwischenlagerzeit ca. 31 a.

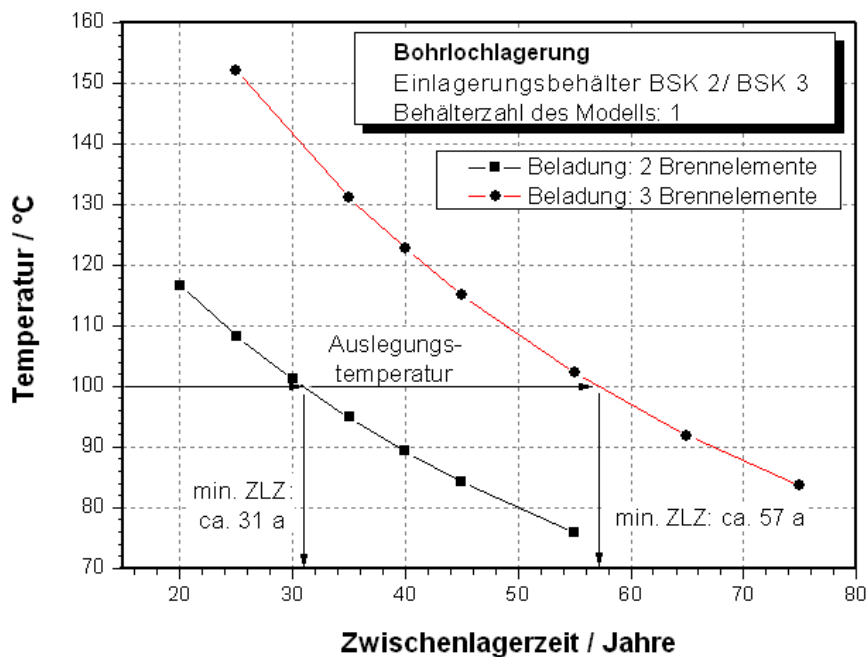


Abbildung 3-34: Maximaltemperatur am heißesten Punkt als Funktion der Zwischenlagerzeit für die Behälter BSK 2 und BSK 3

Die weiteren Berechnungen erfolgten daher unter Annahme einer reduzierten Belastung der Brennstabkokille mit den Brennstäben aus 2 Brennelementen (BSK 2) unter dem konservativen Ansatz einer Zwischenlagerzeit von 32 a.

3.2.5.5 Ermittlung des Behälterabstandes d

In der zweiten Untersuchungsphase wurden die Behälterabstände innerhalb eines Bohrloches variiert. Die Berechnungen erfolgten an einem Modell mit 3 Brennstabkokillen in einem Bohrloch für eine Zwischenlagerzeit von 32 a. Die Berechnungen erfolgten unter Ansatz eines numerischen Modells mit ausreichenden Abmessungen (Länge x Breite: 75 m x 75 m), sodass thermische Randeffekte innerhalb des Betrachtungszeitraumes vernachlässigt werden können.

Für die Auswertung der durchgeführten Berechnungsfälle wurden 2 Behälterniveaus ausgewählt, und die sich in diesen Niveaus einstellenden Maximaltemperaturen miteinander verglichen.

Hierbei zeigte sich für vertikale Behälterabstände $d < 8$ m ein deutlicher Überlagerungseffekt im resultierenden Temperaturfeld, wobei die maximalen Temperaturen für die verschiedenen Behälterniveaus sowohl stark voneinander differierten als auch deutlich über der Auslegungstemperatur lagen. Für vertikale Behälterabstände $d \geq 8$ m konnten wesentlich geringere Temperaturunterschiede zwischen den Behälterniveaus mit $\Delta T < 1$ K beobachtet werden, wobei die Maximaltemperaturen der einzelnen Behälterniveaus im Bereich der Auslegungstemperatur bzw. darunter lagen. Die weiteren Berechnungen erfolgten mit einem Behälterabstand $d = 8$ m und einer Behälteranzahl von 4 Brennstabkokillen pro Bohrloch.

3.2.5.6 Ermittlung des Bohrlochabstandes a_b

Auf Basis der vorherigen Untersuchungsergebnisse (Zwischenlagerzeit: 32 a, Behälterabstand $d = 8$ m, 4 Brennstabkokillen pro Bohrloch) erfolgte in Phase 3 eine Variation des Bohrlochabstandes. Die Ergebnisse zeigen bei geringer werdendem Bohrlochabstand eine exponentielle Zunahme der maximalen Temperatur (Abbildung 3-35). Durch die Überlagerung der Temperaturfelder eng benachbarter Bohrlöcher kommt es zu einer Abnahme des Temperaturgradienten, und somit zu einer Behinderung der Wärmeausbreitung. Infolge dieses Wärmestaus steigt die Temperatur für geringer werdende Abstände der Einlagerungsbohrlöcher überproportional an. Dieser Effekt ist für Bohrlochabstände ab < 50 m besonders deutlich (Abbildung 3-35).

Für alle Berechnungsfälle stellt sich die maximale Temperatur am Übergang Behälter/Bentonit in der Mitte der zweiten Kokille oberhalb der Bohrlochsohle ein.

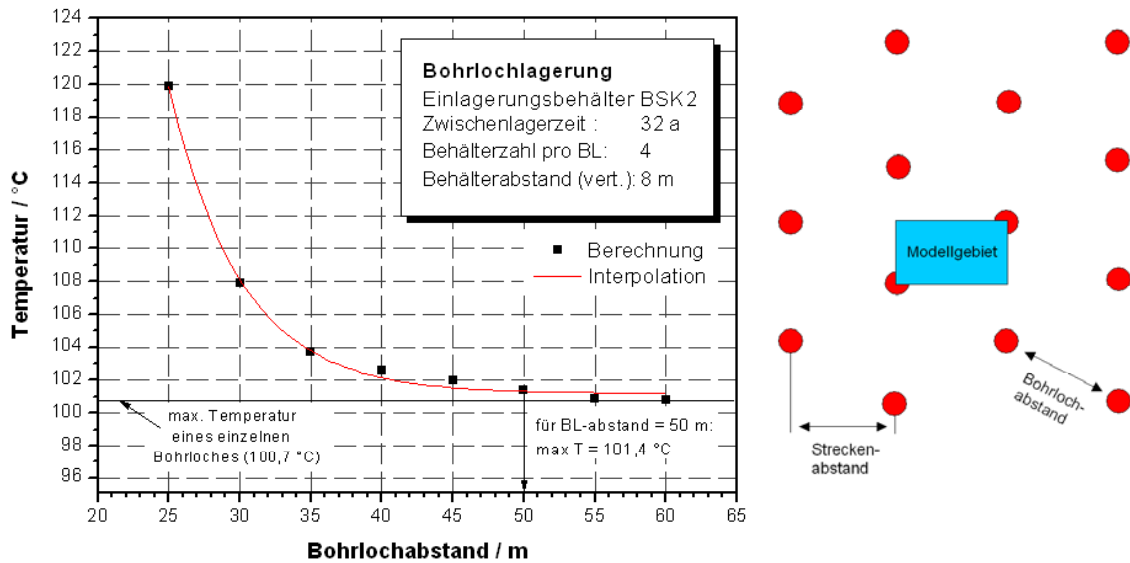


Abbildung 3-35: Maximaltemperatur am heißesten Punkt in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand a_b

Im bentonitgefüllten Ringraum des Einlagerungsbohrloches ist eine exponentielle Abnahme der Temperatur festzustellen. Für einen Bohrlochabstand von 50 m mit einer Maximaltemperatur von 101,4 °C treten beispielsweise in 2,8 cm Entfernung von der Behälteroberfläche 96,4°C auf. In Abbildung 3-37 werden die Temperaturverläufe für ausgewählte Untersuchungspunkte innerhalb des Bentonites für einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren dargestellt.

Abbildung 3-36 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe am heißesten Punkt des Modells für verschiedene ausgewählte Bohrlochabstände innerhalb eines Betrachtungszeitraumes von ca. 30 Jahren. Der Zeitpunkt des Erreichens der Maximaltemperatur ist ebenfalls deutlich vom Bohrlochabstand abhängig und steigt für engere Bohrlochraster stark an. Für Bohrlochabstände $a_s \geq 50$ m werden die Temperaturmaxima innerhalb von ca. 3 Jahren überschritten. Für diese Anordnungen bleiben die Maximaltemperaturen unterhalb 101,5 °C, wobei die Temperaturdifferenz zum Referenz-Berechnungsfall eines einzelnen Bohrloches mit 4 Behältern ($T_{\max} = 100,7$ °C) weniger als 1 K , und die Abweichung von der Auslegungstemperatur < 1,5 K beträgt.

At

Bohr-

At

on der

Die Abweichungen der Maximaltemperatur von der Auslegungstemperatur erschienen für diese ersten indikativen Berechnungen zur orientierenden Gegenüberstellung mit dem Endlagerkonzept in Salz akzeptabel. Für den gewählten Bohrlochabstand $a_b = 50$ m lässt sich ein Streckenabstand von ca. 43,3 m ermitteln.

3.2.5.7 Ermittlung der erforderlichen Feldesgröße

Auf Grundlage der vorangegangenen Untersuchungen können für die Bohrlochlage- rung von BSK 2 Brennstabkokillen unter Annahme der gewählten Einlagerungskonfigu- ration folgende geometrische Parameter angegeben werden

- Behälterabstand $d = 8$ m bei 4 Behältern pro Bohrloch
- Bohrlochabstand $a_b = 50$ m bzw. Streckenabstand $a_s = 43,3$ m.

Die Fläche einer Einlagerungszelle (ein Bohrloch und umgebendes Wirtsgestein) ergibt sich zu

$$A_0 = a_b \cdot a_s$$
$$A_0 = 50 \text{ m} \cdot 43,3 \text{ m} = 2\,165 \text{ m}^2$$

Für die Einlagerung einer Abfallmenge von 8 947 t SM sind ca. 8 286 BSK 2 Endlager- gebinde sowie 2 072 Einlagerungsbohrlöcher erforderlich. Der erforderliche Flächen- bedarf eines Einlagerungsfeldes kann daher mit $2\,072 \cdot 2\,165 \text{ m}^2 = 4,5 \text{ km}^2$ abge- schätzt werden.

Größenbestimmend für ein reales Einlagerungsfeld sind auch hier bergbauliche und langzeitliche sicherheitstechnische Anforderungen hinsichtlich notwendiger Sicher- heitsabstände. Im ersten Entwurf getroffene Annahmen zu den Sicherheitsabständen sind bei Weiterverfolgung des Konzeptes zu verifizieren bzw. anzupassen. Zum Ent- wurf des dritten Konzeptes (Konzeptvariante) „Einlagerung von gezogenen Brennstä- ben ausgedienter Brennelemente in Brennstabkokillen in Bohrlöchern“ wurde die im Folgenden beschriebene Startkonfiguration festgelegt.

Ausgehend vom Durchmesser einer BSK 2-Kokille ist auch hier eine einhüllende Scha- le aus 30 cm dickem Bentonit vorgesehen. Auf die Sohle gelegte Betonfertigteile die- nen als Fundament für ein schienengebundenes Einlagerungssystem (siehe Abbildung 3-38).

Der Einlagerungsvorgang läuft vergleichbar dem Einlagerungsablauf der HAW-Kokille ab.

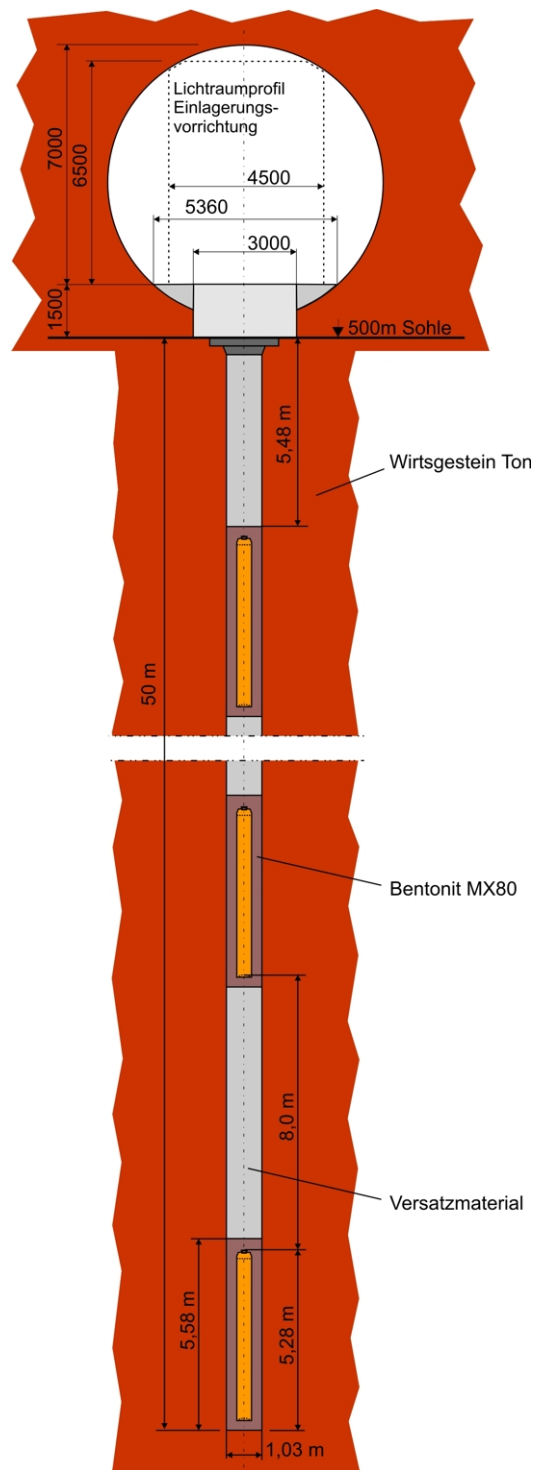


Abbildung 3-38: Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für BSK 2

Ein Einzelfeld (s. Abbildung 3-39) wurde im Entwurf als ein Feld von 36 parallelen Einlagerungsstrecken definiert. Die zu überprüfenden Sicherheitsabstände zu den Richtstrecken wurden mit ca. 50 m angenommen. Der Abstand vom Einlagerungsstreckenende bis zum nächsten Querschlag wurde mit ca. 34 m angenommen. In Abbildung 3-40 ist ein theoretischer Gesamtendlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Bohrlochlagerung von Brennstabkaskillen im Ton dargestellt. Unter Berücksichtigung der Einzelfeldmaße und der bergbaulichen Gesichtspunkte ergeben sich ca. 5,7 km² erforderliche Fläche. Hierin wurde wiederum die erforderliche Fläche für den Infrastrukturbereich nicht berücksichtigt.

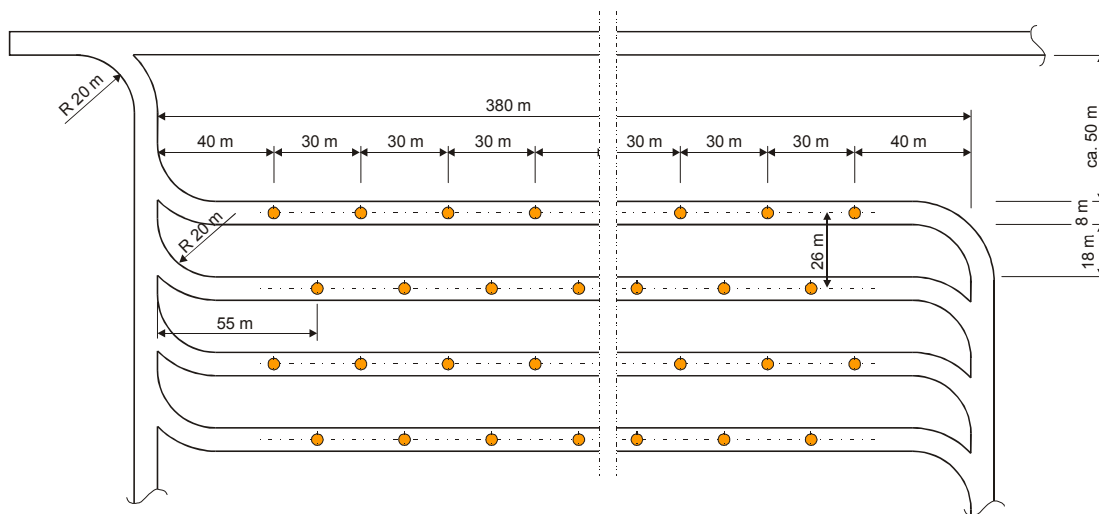


Abbildung 3-39: Bohrlochbeschickungsstrecken für BSK 2

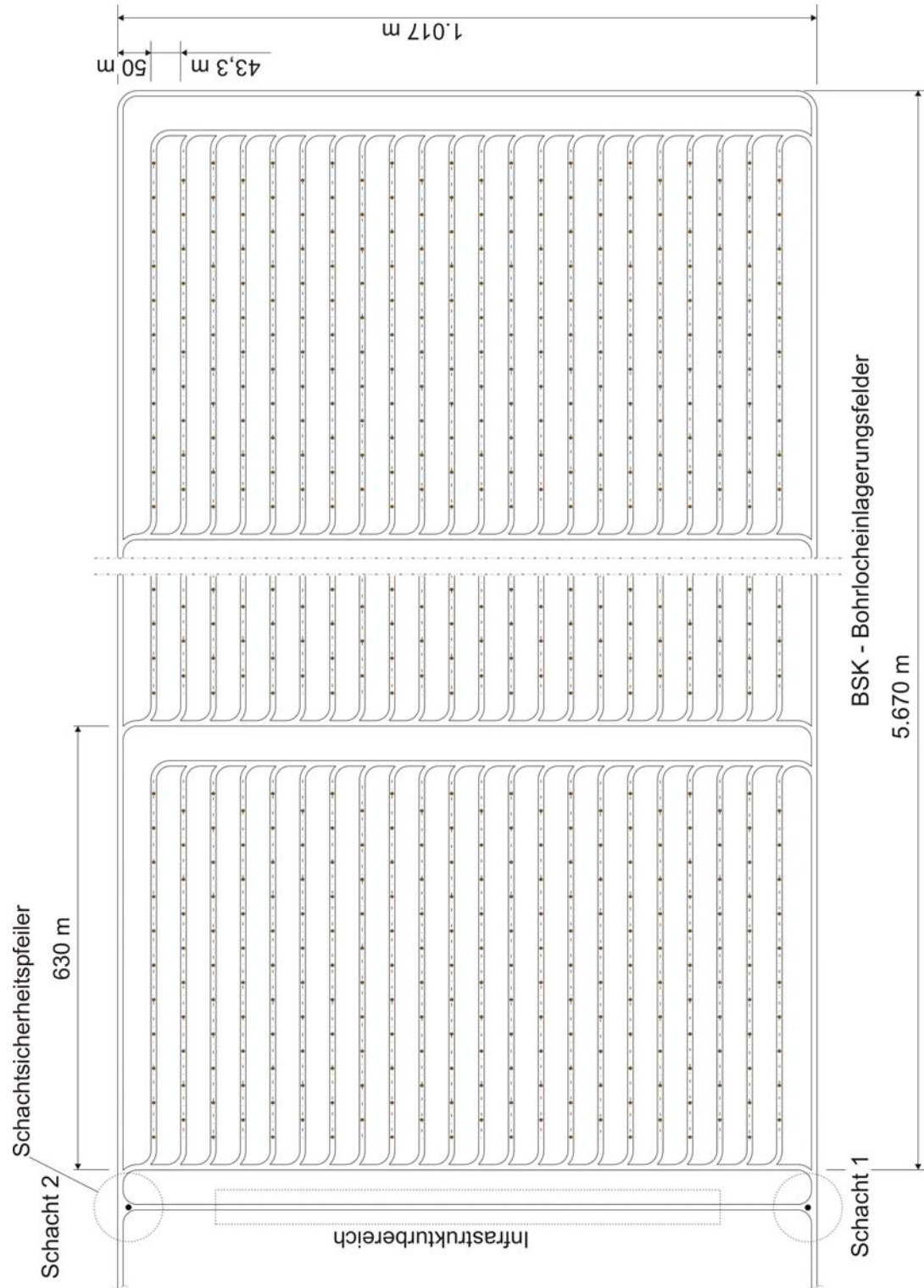


Abbildung 3-40: Einlagerungsbereich für BSK 2

3.3 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit einem Verfüll- und Verschlusskonzept für ein generisches Endlager in Tonformationen in Deutschland. Dazu werden zunächst die international geplanten Endlager- und Mehrbarrierenkonzepte mit den dabei eingesetzten Materialien zusammenfassend dargestellt. Anhand der unterschiedlichen Aufgaben und Funktionen innerhalb der jeweiligen Mehrbarrierenkonzepte werden Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen und -materialien hergeleitet und zusammengestellt. Die endlagerrelevanten Tonformationen auf deutschem Gebiet werden kurz beschrieben und entsprechend den im Vorhaben entwickelten Einlagerungskonzepten Vorschläge für ein Verfüll- und Verschlusskonzept einschließlich einer Zusammenstellung der vorgesehenen Materialien entwickelt.

3.3.1 Internationale Verfüll- und Verschlusskonzepte

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle wird zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit weltweit das Mehrbarrierenkonzept angewandt. Grundidee des Mehrbarrierenkonzeptes ist die wirkungsvolle Verhinderung oder Verzögerung eines Schadstoffaustrages im geforderten Isolationszeitraum aus der ausgewählten Endlagerformation durch das Zusammenwirken aller natürlichen und technischen Barrieren als Gesamtsystem. Die einzelnen Komponenten des Systems, bestehend aus technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren, müssen dabei aufeinander abgestimmt sein und sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen.

In Abhängigkeit von dem natürlichen geologischen Angebot an potentiellen Wirtsgesteinen (Steinsalz, kristalline Gesteine und Ton) werden in einigen Ländern tonige Gesteinsformationen als Wirtsgesteine bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen und untersucht. Die einzelnen nationalen Endlagerkonzepte dafür sind jedoch unterschiedlich weit fortgeschritten und reichen von generellen Machbarkeitsstudien unter den länderspezifischen Bedingungen (Spanien) bis zur Auswahl von konkreten Standorten (Benken in der Schweiz) und den Betrieb von untertägigen Versuchseinrichtungen (Mol in Belgien, Bure in Frankreich und Mont Terri in der Schweiz).

Für ein Endlager in Tonformationen stellen die Abfallbehälter eine technische Barriere dar. Sie werden von den Verfüllmaterialien umgeben, die den Hohlraum zwischen Abfallbehälter und Wirtsgestein ausfüllen. In den nachfolgend aufgeführten internationalen Verfüllkonzepten (s. a. Anlagenband 1) werden Bentonite, z. T. auch graphitisiert, oder Bentonit-Quarzsand-Mischungen dafür favorisiert. Als Verschlussmaterial zum Verschluss der künstlich geschaffenen Verbindungswege (Stollen, Schächte, Bohrlöcher) werden Bentonite, Bentonit/Gesteinsmehl-Mischungen, anfallendes Ausbruchsmaterial und Betone betrachtet. Verfüll- und Verschlussmaterialien stellen geotechnische Barrieren dar. Entscheidend für die Qualität der Barrierewirkung insgesamt sind

neben der Konditionierung der Abfälle und dem Isolationspotential der Endlagerformation auch die gezielte Einstellung von Verfüll- und Verschlussmaterialien auf Abfallgebinde und Wirtsgestein bzw. zu erwartende Formationswässer.

3.3.1.1 Belgien

In Belgien wird in einer Tiefe von 185 bis 275 m die ca. 100 m mächtige, tertiäre Wirtsbildung „Boom Clay“ im Bereich des Forschungszentrums Mol im Untertagelabor „Hades“ hinsichtlich seiner Eignung für die Endlagerung untersucht. Der Boom Clay wird als ein plastisch-verformbarer Ton beschrieben. Entsprechend dem von der belgischen Endlagerorganisation NIRAS/ONDRAF erarbeiteten Endlagerkonzept sollen hochradioaktive und langlebige mittelaktive Abfälle in verschiedenen Strecken des Endlagers eingelagert werden. Das Konzept sieht eine Einlagerung des HAW in metallischen Behältern zentrisch in den Strecken vor. Die Behälter sind so konzipiert, dass sie einerseits als wirksame Barriere während der Hochtemperaturphase des Endlagers wirken und andererseits durch Korrosionsprozesse möglichst wenig Wasserstoff während der anaeroben Phase des Endlagers produzieren.

Die Einlagerungsstrecken werden mit vorgefertigten Betonelementen mit einer Stärke von ca. 25 cm ausgebaut. Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht vor, dass der Ringraum zwischen den Endlagerbehältern und dem betonierten Ausbau der Lagerstrecken mit vorkompaktierten Blöcken bestehend aus einem Gemisch von 60% Bentonit (FoCa-Ton), 35% Sand und 5% Graphit ausgefüllt wird. Vor dem Einbringen der Endlagerbehälter in die zentrisch dafür vorbereiteten Einlagerungsrohre wird der Bentonitausbau bis zur Sättigung gewässert. Um den Schwelldruck des Bentonits am Austritt in die Hauptstrecken aufzunehmen, wird der Ringspalt an den Hauptstrecken verschlossen.

In der Ton-Sand-Graphit-Mischung ist ein quellfähiger Ca-Bentonit, der FoCa-Ton aus der Umgebung von Fourges-Cahaignes im Pariser Becken, vorgesehen. Er ist chemisch kompatibel mit dem Boom Clay. Der FoCa-Ton erhält das Quellvermögen durch einen Gehalt von ca. 40 Gew.-% Beidellit (Smektit). Abhängig von der Kompaktierungsdichte kann er einen Quelldruck zwischen 4 – 5 MPa entwickeln. Der Quarzsand begrenzt das Quellvermögen, um die Druckbelastung der Umgebung durch das Quellen des Tons an die natürlichen Bedingungen anzupassen. Durch den Graphitzusatz wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials unabhängig vom Sättigungszustand wesentlich erhöht. In [3-25] wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials mit 4 W/m K angegeben gegenüber einer Wärmeleitfähigkeit des Boom-Clays von 1,69 W/m K. Die Bentonitverfüllung ist somit ein wesentlicher Bestandteil des technischen Barrierensystems zur Gewährleistung einer optimalen Wärmeabführung von den Behältern ins Gebirge.

Die Verfüllung der Hauptstrecken und der Verbindungsstrecke soll mit einem Ton-Sand-Gemisch erfolgen. Anschließend werden die Strecken versiegelt. Für die Hauptstrecken sind dabei zwei wasserdichte Verschlussbauwerke vorgesehen, die hintereinander angeordnet werden.

Die Verfüllung der Einlagerungsstrecken für HLW mit geringer Wärmeentwicklung und LILW sowie der übrigen Strecken und der Schächte soll mit Beton oder ähnlichem Material erfolgen bzw. mit einem Gemisch aus FoCa-Ton und Sand.

An den Schachtverschluss werden folgende Hauptanforderungen gestellt:

- Die Permeabilität sollte der der Wirtsgesteinsformation entsprechen. Etwas höhere Werte können zulässig sein, wenn die Sicherheitsanalysen zeigen, dass auch unter diesen Bedingungen die Dosis-Kriterien bzw. Risikokriterien eingehalten werden.
- Der Verschluss der Auflockerungszone um den Schacht ist eine wesentliche Aufgabe des Schachtverschlusses.
- Der Verschluss des Schachtes soll den maximal zu erwartenden Gas- und Wasserdrücken in der Endlagerteufe widerstehen.
- Der Schachtverschluss muss den durch die Konvergenz der Wirtsgesteinsformation hervorgerufenen Spannungen widerstehen können.
- Die minimale Standzeit des Verschlusses soll zwischen einigen Tausend Jahren bis zu 100.000 Jahren liegen.

In den laufenden Experimenten mit Verfüll- und Verschlussmaterialien wird u. a. ein Bentonit untersucht, der gepresst eine Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ aufweist und nach Sättigung einen Schwelldruck von 4,4 MPa, was der lithostatischen Spannung der Wirtsgesteinsformation entspricht. Die hydraulische Durchlässigkeit nach Sättigung des Bentonits wird mit ca. 10^{-13} m/s angegeben.

3.3.1.2 Frankreich

Die ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) ist die Organisation, die in Frankreich für die Entsorgung und vor allem für die Endlagerung der dort anfallenden radioaktiven Abfälle zuständig ist. Das Entsorgungskonzept Frankreichs enthält sowohl Oberflächenendlager als auch geologische Endlager. Die Tabelle 3-12 zeigt die für die unterschiedlichen Abfallkategorien vorgesehene Endlagerung.

Abfallkategorie	Kurzlebige Hauptnuklide < 30 Jahre	Langlebige Hauptnuklide >30 Jahre
Natürliche Aktivität	Vorgesehen ist Oberflächenendlagerung	
Sehr schwachaktive Abfälle (VLLW)		
Schwachaktive Abfälle (LLW)	(Abfallkategorie A) Oberflächenendlagerung in den Endlagern Centre de La Manche (CM) sowie Centre de l'Aube	Untersuchung der Endlagerung radioaktiver Abfälle mit Ra- bzw. Grafitgehalt
Mittelaktive Abfälle (ILW)		
Hochaktive Abfälle (HLW)	Untersuchung der geologischen Endlagerung gem. Gesetz vom 30.12.1991	

Tabelle 3-12: Konzeption der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frankreich /3-21/

ANDRA errichtet z. Zt. ein Untertagelabor an einem Standort bei Bure im Departement Meuse in der 130 m mächtigen Callovo-Oxford Tonformation in einer Tiefe von ca. 500 m /3-32/, um die Eigenschaften des Wirtsgesteins Ton zu untersuchen und Einlagerungstechnologien zu erproben.

Für das französische Endlagerkonzept in Ton sind vier Endlagerzonen vorgesehen, jeweils eine für die Abfallkategorien mittelaktive Abfälle (LL-ILW), verglaste hochaktive oder langlebige Abfälle (HLW), ausgediente Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente (Kategorie CU1) und MOX-Brennelemente (Kategorie CU2). Die Zonen sind räumlich getrennt voneinander im Bergwerk angeordnet, um eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Abfallkategorien zu vermeiden und um einen flexiblen Ablauf der Einlagerung der Gebinde in die verschiedenen Zonen zu gewährleisten. Jede Endlagerzone ist in Endlagerfelder eingeteilt, in denen die Endlagerstrecken bzw. Handhabungsstrecken angeordnet sind. Endlagerzonen, Endlagerfelder und Endlagerstrecken sind über ein Netz von Transportstrecken verbunden.

Als Versatzstoff für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken wird eine Mischung aus ca. 60 Gew. % quellfähigen Ton (Ca-Bentonit), 35 Gew. % Quarz und etwa 5 Gew. % Graphit betrachtet. Dieses Material soll vorkompaktiert in die Einlagerungsstrecken eingebracht werden. Der Quarzsand begrenzt das Quellvermögen, um die Druckbelastung der Umgebung durch das Quellen des Tons an die natürlichen Bedingungen anzupassen. Der Graphitzusatz dient zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Versatzstoffes unabhängig vom Sättigungszustand. Als quellfähiger Ton ist der FoCa-Ton (Ca-Bentonit) aus der Umgebung von Fourges-Cahaignes im Pariser Becken

vorgesehen. Dieser Ton erhält das Quellvermögen durch einen Gehalt von ca. 40 Gew. % Beidellit (Smektit). Abhängig von der Kompaktierungsdichte beträgt der Quelldruck zwischen 4 - 5 Mpa.

Für die Endlagerung der Gebinde (Container) der Kategorie schwach- und mittelaktive Abfälle (LL-ILW) sind Blindstrecken mit einer Gesamtlänge von ca. 320 m vorgesehen, die eine leichte Neigung (1 %) zum hinteren Ende aufweisen. Für diese Einlagerungsstrecken ist keine Verfüllung der nach der Stapelung der Container verbliebenen Hohlräume vorgesehen. Nach Abschluss der Einlagerung werden die Einlagerungszellen mit einem Verschluss auf Zementbasis und Bentonit verschlossen.

Eine typische Einlagerungszelle für die Abfallkategorie hochaktive und langlebige Abfälle (verglaste HLW) 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, dem Bohrlochkopf und dem mit einem Metallrohr verkleideten Einlagerungsabschnitt. Der Einlagerungsabschnitt mit einer Länge von ca. 30 m ist mit einem verlorenen Metallrohr mit einem Innendurchmesser von 620 mm oder 685 mm und einer Wandstärke von 25 mm bestückt. Das Rohr wird aus Kohlenstoffstahl gefertigt und ist für eine Standzeit von ca. 100 Jahren ausgelegt. Die Abfallgebinde werden im Einlagerungsrohr durch Abstandhalter voneinander getrennt. Der Abstandhalter ist ein mit Sand gefüllter Behälter mit den gleichen Abmessungen wie die Endlagerbehälter. Der Verschluss des Bohrlochkopfes erfolgt mit einem Metallpropfen, einem Bentonit- und einem Beton-Stopfen. Der Metallpropfen ist mit einer Keramikschicht versehen, um eine Kontaktkorrosion zu vermeiden und die Rückholbarkeit der Brennelementbehälter zu erleichtern. Die Zeitdauer der Schutzfunktion dieses Stopfens wird auf ca. 100 Jahre bewertet. Der Bentonit-Stopfen wird mit einer Stärke von ca. 3 m eingebracht, der bis zur Auflockerungszone der Handhabungsstrecke reicht. Dieser Bentonit-Stopfen hat die Hauptbarrierefunktion in diesem Bereich der Einlagerungszelle, die dieser für eine Zeitspanne von 1000 bis 10^6 Jahren wahrnehmen soll.

Der restliche Bereich der Einlagerungszelle bis zur Handhabungsstrecke wird mit Beton verfüllt. Dieser Betonverschluss hat in der Anfangsphase die Funktion, eine Verformung des Bentonit-Stopfens zu verhindern und dient nach der Sättigung des Bentonits als mechanischer Einschluss des Bentonits und Permeabilitätsbarriere. Die Zeitdauer der Barrierenwirkung dieses Verschlusses wird auf ca. 10^6 Jahre bewertet.

Die Einlagerungszellen für Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente (Kategorie CU1) und für MOX-Brennelemente (Kategorie CU2) stellen horizontale Bohrungen mit Durchmessern von 2600 mm bzw. 3200 mm dar. Die Länge der Bohrlöcher beträgt 43 m bzw. 46 m. Das Bohrloch ist mit einem Metallrohr verkleidet, das aus 2 m langen Metallringen zusammengefügt ist. Die Wandstärke des Metallrohres beträgt 30 mm (CU1) bzw. 25 mm (CU2). Das Metallrohr ist perforiert, um einen Zutritt von Feuchtigkeit und damit die Sättigung des Bentonits zu ermöglichen. Die Perforierung ist so

minimal wie möglich gehalten, um die mechanische Standfestigkeit möglichst gering zu beeinflussen. In das Metallrohr wird eine Bentonitauskleidung eingebracht, die aus zylindrischen Bentonitringen zusammengesetzt wird. Die Bentonitringe werden vor dem Einbringen mittels Metallbänder zu Paketen aus jeweils vier Ringen zusammengepackt. Die Bentonitringe werden aus einer Mischung mit 70 % Bentonit und 30 % Sand gefertigt. Die Hauptkenndaten der Bentonitringe sind folgende:

- Durchlässigkeit $< 10^{-11}$ m/s
- Wärmeleitfähigkeit $> 1,5$ W/m/°C (gesättigt)
- Quelldruck ca. 3 MPa

Im Innern der Bentonitauskleidung befindet sich das Einlagerungsrohr aus dem gleichen Kohlenstoffstahl, aus dem die Endlagerbehälter gefertigt werden, mit einem Innendurchmesser von 1320 mm bzw. 716 mm und einer Wandstärke von 25 mm. Die Standfestigkeit des Rohres bezüglich Korrosion und Druck soll 1000 Jahre erhalten bleiben.

Neben den Verschlüssen der Einlagerungszellen zählen die Rückverfüllung der Hohlräume außerhalb der Einlagerungsstrecken und der Verschluss von Strecken und Schächten zu den drei wesentlichen Elementen des Verfüll- und Verschließkonzeptes. Die Handhabungsstrecken werden mit einem Gemisch auf Zementbasis verfüllt. Dämme in den Transportstrecken sollen ebenfalls aus einem Material auf Zementbasis errichtet werden. Die Verfüllung der übrigen Hohlräume soll mit Aushubmaterial erfolgen.

3.3.1.3 Schweiz

Die Aufgabe der Vorbereitung einer sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle wird in der Schweiz von der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) wahrgenommen. In einem breit angelegten, auf den Grundanforderungen an ein geologisches Tiefenlager beruhenden Evaluations- und Einengungsverfahren wurde der Opalinuston als prioritäre Sediment-Wirtsgesteinsoption und das Züricher Weinland als Gebiet erster Priorität für die Standort bezogene Erkundung hinsichtlich der Realisierung eines Tiefenlagers für hochaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente bestimmt. Dort weist der Opalinuston eine Mächtigkeit zwischen 110 - 120 m in einer Tiefe von ~ 530 bis 650 m auf [3-33].

Das in der Schweiz für den Opalinuston vorgeschlagene Endlagerkonzept für Ausgediente Brennelemente (BE) und verglaste Abfälle (HAA) besteht aus parallelen subhorizontalen Lagerstollen mit einem Durchmesser von 2,5 m und einem Stollenabstand von 40 m. In einer Entfernung von einigen Hundert Metern zu dem Einlagerungsfeld für BE/HAA sind drei Lagerstollen für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) vorgesehen.

Die Endlagerbehälter werden liegend auf kompaktierten Bentonitblöcken in den Einlagerungsstollen mit einem Abstand von 3 m zwischen den Behältern entlang der Stollenachse platziert. Die verbleibenden Hohlräume werden mit Hilfe einer Förderleitung mit Bentonitgranulat verfüllt. Aufgrund ingenieurtechnischer Erfahrung beläuft sich der Porenraum in solchen Schüttungen auf 40 - 50 Vol. %. Die gefüllte Strecke soll dann mit einem Betondamm verschlossen werden, wobei alternative Lösungen untersucht werden. Beim Zutritt von Lösungen quillt der Bentonit, nimmt Wasser in seine Struktur auf und dichtet so das Endlager gegen Lösungstransport ab. In der Nähe der Abfallbehälter wird auf zementierte/betonierte Strukturelemente verzichtet /3-34/. Die Bentonitblöcke unter den Gebinden sind aus hochkompaktiertem Bentonit gefertigt, mit einer Trockendichte von $1,7 \text{ t/m}^3$. Das Bentonitgranulat hat eine Trockendichte der einzelnen Granulatkörner von $2,2 \text{ t/m}^3$, so dass die mittlere Trockendichte der Schüttung ca. $1,5 \text{ t/m}^3$ beträgt. Die Hauptkenndaten der Bentonitblöcke und des granularen Bentonits (MX-80 Bentonit) sind folgende:

- Trockendichte der Bentonit-Blöcke: 1700 kg/m^3
- Gesamtwassergehalt des eingebauten granularen Bentonits: 2 %
- Trockendichte des Bentonit-Granulats: ~ 2100 bis 2200 kg/m^3
- Durchschnittliche Schüttdichte des Bentonit-Versatzes nach der Einbringung (incl. der Blöcke): $\sim 1500 \text{ kg/m}^3$
- Thermische Leitfähigkeit des granularen Versatzes nach der Einbringung: $0,4 \text{ W/m K}$
- Thermische Leitfähigkeit (Konduktivität) nach Sättigung: $1,4 \text{ W/m K}$
- Spezifische Wärmekapazität: 1000 J/kg K
- Quelldruck: $\sim 2 \text{ Mpa}$

Das Mehrbarrierenkonzept setzt sich im Nahbereich zusammen aus den einschlusswirksamen Eigenschaften der Primärabfälle (Hüllrohre der ausgedienten Brennstäbe und die Glasmatrix der HAW-Abfälle), der Endlagerbehälter (Edelstahlkokille und Stahlbehälter) und der Bentonitverfüllung in den Einlagerungsstollen. Zum einen soll dadurch der Einschluss der radioaktiven Materialien langfristig gewährleistet und zum anderen die Radionuklidfreisetzung verhindert werden.

Die Anforderung an eine Streckenversiegelung konzentrieren sich auf:

- Möglichst geringe Durchlässigkeit innerhalb der Versiegelungszone sowie auch der peripheren Auflockerungszone.
- Möglichst großer Widerstand gegen Verformung des Gebirges, um weiterreichende Auflockerung zu vermeiden.
- Guter Verbund und Haftbarkeit mit dem Wirtsgestein.
- Einfache Einbaumöglichkeit mit vernünftiger Qualitätskontrolle.
- Chemische Verträglichkeit mit dem Wirtsgestein,
- Ausreichende Sorptionsvermögen für Radionuklide bzw. geringe Diffusivität.

In den Lagerstollen BE/HAA erfolgt die Streckenverfüllung mit Bentonitgranulat während der Einlagerung der Abfälle, und bei den Lagertunneln LMA werden die Resthohlräume unmittelbar nach abgeschlossener Belegung mit Beton verfüllt. Zur Streckenverfüllung im übrigen Bereich des Opalinustons und der Rahmengesteine ist der Einbau eines Bentonit/Quarzsand-Gemisches im Verhältnis 30/70 % vorgesehen. Für die Verfüllung der Zugangstunnel und des Schachtes in den überliegenden Schichten wird der Einsatz von Opalinuston geplant. Die detaillierten Maßnahmen zur Abtrennung von Aquiferen in den überliegenden Schichten werden aufgrund der Ergebnisse beim Rampenbau bzw. Schachtabteufen festgelegt.

Das Schachtverschlusskonzept sieht ein mehrschichtiges Verschlussbauwerk aus natürlichen Materialien vor. Zwei Widerlager werden aus Schotterkies mit entsprechenden Übergangsschichten zum Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit hergestellt. Die Widerlager werden zum einen oberhalb der Opalinuston-Formation bis unterhalb des Schachtröhrenfundamentes und zum anderen im Schachtsumpf bis über den Stollenabgang zum Endlager hinaus angeordnet. Die Verfüllung des unteren Widerlagers wird gegen Auslaufen in die vom Schacht abzweigenden Stollen durch entsprechend verdichtete Vorschüttungen gesichert. Zwischen diesen beiden Widerlagern befindet sich das ca. 40 m lange Dichtelement. Vor dessen Einbau wird eine mögliche Auflockerungszone um die Schachtröhre entfernt und der verbleibende Querschnitt mit Bentonit gefüllt.

3.3.1.4 Spanien

In Spanien erfolgte im November 1992 die ersten Einlagerungen in das mit künstlichen Barrieren für schwach- und mittelaktive Abfälle ausgestattete oberflächennahe Endlager El Cabril. Für hochaktive Abfälle läuft seit 1986 ein Standortprüfverfahren zur Erstellung einer „nationalen Bestandsaufnahme günstiger Formationen“ und zur Identifizierung geeigneter Orte für ein tiefes geologisches Endlager. Die ENRESA, zuständige Organisation in Spanien für die Endlagerung, untersuchte die Eignung für die Errichtung eines geologischen Endlagers von drei verschiedenen Wirtsgesteinsformationen – Ton, Granit und Salz. Die Arbeiten konzentrierten sich dabei in erster Linie auf Granit und Ton.

Ein Endlager in einer Tonformation soll in einer Teufe von ca. 250 m errichtet werden. Das Konzept sieht vor, dass der Zugang zum Endlager über drei Schächte und eine Rampe erfolgt. Die Rampe mit einem Durchmesser von ca. 6 m und einer Länge von 2800 m in Ton ist für den Transport der Abfallgebinde nach Untertage bestimmt.

Die Einlagerung der mittelaktiven Abfälle soll in einen Silo erfolgen. Der Silo mit einem Durchmesser von 26 m und einer Höhe von 60 m soll mit einer Wandstärke von 1 m aus Beton errichtet werden. Zwischen der Außenwand des Silos und dem Gebirge

besteht ein Zwischenraum von 1 m, der bei der Errichtung des Silos mit Bentonitblöcken verfüllt wird. Als Verfüllmaterial wird der „FEBEX-Bentonit“ (Cortijo de Archidona aus Almeria), ein Ca-Bentonit, vorgesehen.

Hochaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente werden in Endlagerstrecken von ca. 500 m Länge und einem Durchmesser von 2,40 m eingelagert. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 35 m und zwischen den Containern 2 m, um die festgelegte Grenztemperatur von 100 °C des Verfüllmaterials nicht zu überschreiten. Die Mächtigkeit des Verfüllmaterials beträgt zwischen Endlagerbehälter und Streckenwand 0,74 m.

Es wird abschnittsweise jeweils für die Einlagerung eines Containers der ringförmige Ausbau der Einlagerungsstrecke mit Bentonitblöcken vorgenommen, in die mittig das Einlagerungsrohr installiert wird. Das perforierte Einlagerungsrohr mit einem Innendurchmesser von 92 cm und einer Wandstärke von 1,5 cm soll aus Stahl gefertigt werden. Nachdem ein Container mittels eines hydraulischen Schiebers eingebracht wurde, werden Bentonitblöcke in das Einlagerungsrohr installiert, die den festgelegten Abstand zum nächsten Container gewährleisten.

Die Hauptkennndaten der Bentonitblöcke sind folgende /3-35/:

- spezifisches Gewicht: 2700 kg/m³
- Trockendichte der Blöcke: 1800 kg/m³
- Trockendichte der Puffermaterials: 1600 kg/m³
- Dichte des gesättigten Puffermaterials: 2000 kg/m³
- Porosität des Puffermaterials: 0,4
- Thermische Leitfähigkeit (Konduktivität): 0,57 W/m K
- Thermische Leitfähigkeit bei Sättigung (Konduktivität): 1,28 W/m K
- Spezifische Wärmekapazität 1000 J/kg K
- Quelldruck: 5 Mpa

3.3.2 Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien

Die ausreichende Rückhaltung der Nuklide durch das Mehrbarrierensystem wird an den radiologischen Schutzziele gemessen wie sie von der Internationalen Atomenergie-Organisation /3-36/ formuliert, in dem „Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ festgelegt /3-37/ und von der Europäischen Gemeinschaft übernommen wurden /3-38/. Allen Schutzziele voran steht die dauerhafte Isolierung radioaktiver Abfälle von der Biosphäre, um Mensch und Umwelt zu schützen. Zukünftige Generationen sollen zudem nicht mehr als „zumutbar“ durch die Auswirkung der Endlagerung belastet oder verpflichtet werden.

Der Verfüllung und dem Verschluss eines Endlagers fällt die Aufgabe zu, die Integrität der durch die bergbaulichen Aktivitäten verletzten, geologischen Barriere wieder herzustellen und das Endlager vor dem unbeabsichtigten Zutritt von Personen zu sichern. Die geotechnischen Barrieren bilden dabei eine bedeutende hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall. Angestrebt wird nicht allein ein vollständiger Einschluss der Endlagerbehälter, sondern auch eine ausreichende Rückhaltung bzw. die Verzögerung des Transports der im Versagensfall aus den Behältern freigesetzten Radionuklide. Durch die geotechnischen Barrieren soll über sehr lange Zeiträume der Transport durch Konvektion ausgeschaltet sowie der Schadstofftransport durch Diffusion eingegrenzt werden. Weiterhin soll der Transport von korrosiven Substanzen zum Endlagerbehälter minimiert sowie ein günstiges chemisches Umfeld bezüglich der Korrosionsraten gewährleistet werden.

Vorraussetzung hierfür ist allerdings, dass die geotechnischen Barrieren eine Dauerhaftigkeit und Robustheit gegenüber Veränderungsprozessen aufweisen, so dass die Eigenschaften des Materials nicht durch äußere Einflüsse wie z. B. Lösungszusammensetzung oder hohe Temperaturen im Nahfeld des Endlagerbehälters beeinträchtigt werden. Die Robustheit ergibt sich einerseits aus der Materialwahl und Dimensionierung der Barrieren, und andererseits aus der Verwendung eines Systems von mehreren gestaffelten, passiven Sicherheitsbarrieren aus Hohlraum-, Strecken- und Schachtverfüllung bzw. -verschluss, die den Verzicht auf weitere Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen zulassen.

Die einzelnen Barrieren sollen in ihrer Art und Beschaffenheit verschieden und so bemessen sein, dass eine vorhergesehene oder unvorhergesehene Schwächung einer Barriere durch die Rückhaltewirkung der anderen Barrieren aufgefangen wird. Die Barrieren wirken zeitlich gestaffelt. Im Idealfall können durch den sicheren Einschluss, den die geotechnische und geologische Barriere gewährleisten sollen, potentiell korrosive Fluide im Falle eines Flüssigkeitszutritts den Endlagerbehälter nicht erreichen. Solange der Endlagerbehälter dicht ist, ist die Rückhaltewirkung des Glaskörpers (HAW) oder des Brennstoffs (POLLUX-3/BSK 2) ungeschmälert gewährleistet und andere Barrieren werden nicht beansprucht. Erst nach Versagen der Endlagerbehälter kommt das Abfallglas respektive Brennstoff in Kontakt mit Wasser, und die langsame Freisetzung durch Auflösung kann beginnen. Mit dem Beginn der Auflösung kommt dann die Rückhaltewirkung der Barriere zum Tragen. Für viele Nuklide wird der Diffusionsfluss durch das Erreichen der Löslichkeitsgrenze an der Innenseite der Barriere stark eingeschränkt. Der Grossteil der Radionuklide zerfällt bereits im Abfallglas respektive in den Brennstäben oder in der Barriere. Erst nach einem Durchbruch der Nuklide durch die geotechnische Barriere kommt die Rückhaltewirkung der Geosphärenbarriere ins Spiel.

Durch die Verfüllung und den Verschluss soll mechanisch eine gebirgsstützende Wirkung erzielt werden. Um langfristig eine Ausweitung der Auflockerungszone um die

Hohlräume zu vermeiden, muss ein Verschluss auch langfristig den Gebirgsdruck aufnehmen können. Jedoch ist darauf zu achten, dass bei Verwendung von quellfähigen Materialien keine zu hohen Quelldrücke entstehen, die zum Aufbrechen des Wirtsgesteins führen.

An die Verfüll- und Verschlussmaterialien werden folgende allgemeine Anforderungen gestellt, so wie sie auch für ein kanadisches Endlager gefordert werden /3-39/.

- Die Materialien müssen in entsprechenden Mengen von gleicher Qualität/Eigenschaft verfügbar sein.
- Die Materialien müssen verarbeitbar sein und mit verfügbarer Technologie eingebaut werden können.
- Die Materialien sollen eine hohe thermische Leitfähigkeit in Übereinstimmung mit anderen Materialanforderungen haben
- Die Materialien sollen ein prognostizierbares Langzeitverhalten haben

Für die verschiedenen Verfüll- und Verschlussmaterialien werden darüber hinaus folgende technische Anforderungen definiert.

- Vollständige Umhüllung eines jeden Behälters
- Verhindern der Bewegung und chemische Modifikation des Grundwassers in Behälternahe, so dass die Behälterkorrosion begrenzt wird
- Verzögerung der Bewegung von Nukliden bis in den Bereich der Diffusion durch Verbesserung der Sorptionseigenschaften und durch Veränderung der Grundwassereigenschaften
- Bei Bentoniten Temperatur auf 100° C begrenzen, um die Bildungsrate von Smektit/Illit-Transformationen zu minimieren und Dampfbildung zu verhindern
- Entwicklung eines Quelldrucksanstieges bei zutretendem Grundwasser, so dass alle Poren geschlossen sind oder Bereiche mit geringerer Dichte kompaktiert werden

In vergleichbarer Weise werden Anforderungen an Materialien zum Füllen von Lücken und an Beton- und Injektionsmaterialien gestellt. Damit soll erreicht werden, dass mit abgestuften Anforderungen an die vorgesehenen Materialien eine vollständige Verfüllung aller Hohlräume erreicht und Verfüll- und Verschlusselemente auch in der vorgegebenen Position gehalten werden.

3.3.3 Verfüll- und Verschlussmaterialien

Bei den vorher beschriebenen internationalen Verfüll- und Verschlusskonzepten erfüllen offensichtlich Bentonite und Bentonit-Zuschlagsstoff-Gemische die Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien am ehesten. Bentonite weisen günstige physiko-

chemische Eigenschaften in Bezug auf Abdichtaufgaben auf, wie z. B. hohe Quellfähigkeit und niedrige Permeabilität sowie gute Sorptionsfähigkeit für Radionuklide. In der Literatur werden als Verfüll- und Verschleißmaterialien zwei Bentonite unterschiedlicher Ausgangszusammensetzung beschrieben, Natrium- (Na-) und Calcium- (Ca-) Bentonit. Diese werden nachfolgend einander gegenübergestellt und hinsichtlich der zu erwartenden Verhältnisse in potenziellen Endlagerregionen (Opalinuston in Süddeutschland und Unterkreide-Tone im Norddeutschen Becken) bewertet.

3.3.3.1 Bentonitarten

Von den Tonmineralien weisen die Smektiten in Bezug auf Abdichtaufgaben die günstigsten Eigenschaften auf. Der zu den Smektiten gehörende Montmorillonit ist der Hauptbestandteil von Bentoniten. Gelegentlich findet man in Bentoniten neben Montmorillonit Beidellit ein zweiter, doch weniger häufiger Aluminiumsmektit.

Bentonite und Bentonitzuschlagstoffmischungen erfüllen die vorgenannten Anforderungen und bieten sich an als Material für Dichtsysteme in Endlagern in Tonformationen aufgrund

- der geringen Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. Permeabilitäten,
- ausreichender Quelldrücke im feuchten Zustand zwecks guter Abdichtung der Kontaktbereiche und unter Umständen zum Lastabtrag des Flüssigkeitsdruck sowie Verhinderung der Gebirgsauflockerung,
- eines hohen Sorptionsvermögens gegenüber Radionukliden infolge großer innerer Oberfläche mit hoher Oberflächenaktivität (freie Valenzen),
- der Langzeitbeständigkeit (Tone als dauerhafter Rückstand des Verwitterungsprozesses).

Weiterhin erhofft man sich von Bentoniten als Versatzmaterial eine pH- und Ehpufferwirkung, eine Hemmung von mikrobiellem Wachstum und mikrobieller Mobilität sowie eine Filtrationswirkung für Kolloide und damit eine Verhinderung eines kolloidge-tragenen Transport von Radionukliden. Zudem dient der Bentonit durch zielgerichtete Sandzugabe als Stützmaterial, da er die weitere Konvergenz des verfüllten Stollens stark begrenzt.

In einem Endlager sollen möglichst viele "natürliche" Materialien, wie Bentonit und korrosionsresistente Materialien zum Einsatz kommen. Die Wahl derartiger Materialien macht es möglich, ihre Stabilität und ihr Verhalten in einem Endlagerumfeld über lange Zeiträume durch Vergleich mit ihren natürlichen Vorkommen abzuleiten.

Gewisse Eigenschaften von Bentoniten, z. B. Verdichtbarkeit, Festigkeit, Erosionsbeständigkeit usw. können durch Zugabe von Additiven beeinflusst werden. Jedoch muss

die Verträglichkeit von Bentoniten und Zusatzmitteln noch sorgfältig abgeklärt werden, da die Gefahr ungünstiger Nebenwirkungen besteht. In der Literatur werden sehr viele Additive vorgeschlagen /3-40/:

- Aktivierung von Ca-Bentonit mit Soda bewirkt verbesserte thermische Beständigkeit und erhöhte Plastizität.
- Eine Zugabe von Phosphaten erleichtert die Verdichtung und unterdrückt praktisch die Korrosion der Abfallbehälter.
- Zeolite (Gerüst-Silikate) sind zur Sorption von Cäsium geeignet.
- Aktivkohle ist zur Sorption von Technetium und andere Ionen geeignet.

Viele der im Endlager vermuteten Entwicklungsprozesse des Bentonits werden gegenwärtig untersucht. Relativ rasch ablaufende Veränderungen sind nur im innersten der Bentonit-Packung in Behälternähe bei den anfänglich hohen Temperaturen und Temperaturgradienten zu erwarten.

In Endlagern steht die Verwendung von Bentonit in Form von hochverdichteten Blöcken im Vordergrund. Die Materialeigenschaften werden durch die Bentonittrockendichte und den Bentonitanteil gesteuert. Die Reindichte von Bentoniten liegt im Bereich von 2,4 bis 2,7 g/cm³. Die Trockendichte bezieht sich auf bei einem (theoretischen) Wassergehalt von 0 %. Die Rohdichte ist eine Eigenschaft, die vor allem vom Wassergehalt und von der Verdichtung abhängt. Die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen diesen Parametern ist deshalb wichtig, weil viele Bentoniteigenschaften (z.B. Queldruckausbildung u.a.) davon beeinflusst werden. Bei einer losen Schüttung stellen sich Trockendichten von etwa 1 g/cm³ ein, durch Verdichtung können wesentlich höhere Werte erreicht werden, die theoretisch durch die Reindichte begrenzt werden. Hierbei beeinflussen Wassergehalt und Sättigungsgrad entscheidend die mögliche Verdichtung. Die maximal möglichen Trockendichten werden bei etwa 50 % Sättigung des Bentonits erreicht. Der „optimale“ Wassergehalt liegt bei einem Pressdruck von 100 MN/m² bei $w = 6 \%$, während dieser Wert für einen Pressdruck von 200 MN/m² auf etwa $w = 4 \%$ absinkt, d. h. der „optimale“ Wassergehalt sinkt mit steigendem Pressdruck. Ist der Wassergehalt geringer als der „optimale“, so müssen höhere Pressdrücke aufgewendet werden (Überwindung höherer Reibungskräfte), um eine gleich hohe Trockendichte zu erreichen. Höhere Trockendichten werden mit Mischungen von Bentonit mit z.B. Quarzsand erreicht /3-41/.

Den positiven Barriereigenschaften von Tonen und Bentoniten stehen auch negative gegenüber /3-42/:

- Keine absolute Undurchlässigkeit,
- Ungünstige Beeinflussung der Abdichteigenschaften bei Einwirkung von mineralisierten Wässern, besonders von Salzlösungen, wodurch z.B. in Abhängigkeit von Tonart und einwirkender Flüssigkeit die Permeabilitäten um 1 bis 3 Zehnerpotenzen erhöht und das Quellvermögen wesentlich verringert werden,
- Erodierbarkeit des Tons,
- Keine sichere Voraussage der sich in Abhängigkeit von den Verformungsbedingungen einstellenden Quelldrücke, so dass es unter ungünstigen Bedingungen durch zu hohe Quelldrücke zu mechanischen Überbeanspruchungen in der abzudichtenden Konstruktion bzw. im Gebirge kommen kann,
- die Qualität der Tonabdichtung wird im starkem Maße durch die Einbringtechnologie beeinflusst.

Bentonit oder Tonsteine sind leicht und kostengünstig abbaubar und stehen in ausreichender Menge zur Verfügung. Bedeutende Bentonitlagerstätten befinden sich in den USA (z. B. Na-Bentonit der marinen Kreide aus Wyoming) und Kanada. Ein weiteres großes Bentonitvorkommen liegt in Bayern, nordöstlich von München im Gebiet von Moosburg-Landshut-Mainburg (Ca-Bentonit). Diese abbauwürdigen Bentonite weisen große Mächtigkeiten auf und haben vor allem einen hohen Reinheitsgrad mit Montmorillonit-Gehalten von bis zu 95 %. Der Bentonit wird in Tagebauen gewonnen und anschließend in einer Prozessstufe getrocknet, zerkleinert und klassiert. Im Aufbereitungsprozess darf keine Trocknungstemperatur > 100 °C auftreten, da sonst eine irreversible Schädigung quellfähiger Bestandteile auftreten kann.

Nach /3-43/ können die beiden meist verwendeten Bentonite mineralogisch folgendermaßen beschrieben werden:

- SPV Volclay, Na-Bentonit, Wyoming (USA)
 $(\text{Si}_{3.96} \text{Al}_{0.04}) (\text{Al}_{1.55} \text{Fe}^{3+}_{0.20} \text{Fe}^{2+}_{0.01} \text{Mg}_{0.24}) \text{O}_{10}(\text{OH})_2 \text{Na}_{0.30}$
- Calcigel (früher Montigel), Ca-Bentonit, Deutschland
 $(\text{Si}_{4.0}) (\text{Al}_{1.36} \text{Fe}^{3+}_{0.31} \text{Fe}^{2+}_{0.01} \text{Mg}_{0.35}) \text{O}_{10}(\text{OH})_2 \text{Ca,Mg} / 2_{0.28}$

Die mineralogische Zusammensetzung der Bentonite nach /3-43/ ist in Tabelle 3-13 dargestellt:

Bentonit	Mineralgehalt in %					
	Montmorillonit	Quarz	Feldspat	Glimmer	Karbonat	Sonstige Minerale
SPV Volclay	75	15.2	5 - 8	< 1	1.4	2.4
Calcigel	66	8.3	2 – 4	12 - 15	3.8	5.5

Tabelle 3-13: Mineralogische Zusammensetzung der Bentonite nach /3-43/

In dem schwedischen Konzept zur Endlagerung radioaktiver Abfälle ist geplant, für das Buffer und Backfill Na-Bentonit (MX-80 Bentonit) einzusetzen. Andere Konzepte der geotechnischen Barriere sehen jedoch auf Grund seiner höheren chemischen Stabilität die Verwendung von Ca-Bentonit vor (z.B. Felslabor Grimsel in der Schweiz, das von der NAGRA betrieben wird).

Im Gegensatz zu den anderen silikatischen Mineralen zeichnen sich Bentonite durch besondere mechanische, hydraulische, chemische und thermische Eigenschaften aus. Tabelle 3-14 zeigt in einer Übersicht die mineralogische Zusammensetzung von ausgewählten Bentoniten für internationale Endlagerkonzepte. Die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle relevanten Materialparameter werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Minerale in %	MX-80	MX-80	MX-80	MX-80	MX-80	FoCa	Kinnekkulle	Kunipa F	Almeria (FEBEX)	Calcigel	Calcigel
Buffermaterial betrachtet in											
Quellfähige Tonminerale											
Montmorillonit	75,0	73,5	65 – 75	80 – 84		80	35 - 40	98 - 99	93 +/- 2	66,0	71,3
Kaolinit	< 1,0					4				2	
Quarz	15,2	15	10 – 14	6 – 7		6	30 - 40	< 1	2 +/- 1	8,3	8
Karbonat	1,4	1,4								3,8	3,8
Chlorit + Glimmer			2 – 4								
Chlorit											< 1
Glimmer (Muskovit)	< 1,0	< 1								12 - 15	12 - 15
Glimmer (Phlogopit)				2 – 4							
Karbonate + Chlorit			3 – 5								
Calcit				0,5 – 2		1,4		< 1			
Goethit						6					
Feldspäte (Plagioklas)	5 – 8	5 - 8	5 - 9	3					3 +/- 1	2 - 4	2 - 4
Cristobalit									2 +/- 1		
Hämatit						0,25					
Gips						0,4					
Pyrit	0,3	0,3								n.n.	0
Org. Kohlenstoff	0,4	0,4								0,03	0,03
Akzessorien	2,0	2								2 - 3	2 - 3
Schwerminerale			1 - 3								
	/3-43/	/3-44/	/3-45/	/3-46/	/3-47/	/3-48/	/3-49/	/3-50/	/3-51/	/3-52/	/3-53/

(n.n. = nicht nachweisbar)

Tabelle 3-14: Übersicht über Mineralogie verschiedener Bentonite

3.3.3.2 Bentoniteigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der geotechnischen Barriere werden durch das Quellen, Schrumpfen und Festigkeitsverhalten charakterisiert. Zuschlagsstoffe wie Sand und Splitt werden verwendet, um das Quellen und Schrumpfen zu vermindern und die Festigkeitseigenschaften zu verbessern.

Quellung

Bentonite sind hygroskopisch, d.h. sie haben die Fähigkeit, in Abhängigkeit vom Angebot und den physiko-chemischen Bedingungen, Wasser an die Zwischenschichtkationen anzulagern. Erfolgt diese Wasseraufnahme ohne Deformation, entwickelt der Bentonit einen Quelldruck, der primär von der Dichte abhängig ist. Bei einer Volumen-deformation fällt der Quelldruck. Wird jedoch eine Deformation zugelassen, erfolgt eine Volumenvergrößerung, die als Quellung oder Quellvermögen bezeichnet wird.

Wird der Bentonit feucht eingebaut, wird durch das Vorquellen das nutzbare Quellpotential reduziert. Ein weiterer Nachteil des feuchten Einbaus ist die bei Wasserentzug und damit Austrocknung des Bentonits auftretende Bildung von Schrumpfrissen. Für das Endlager berechnet sich der Quelldruck aus dem im Stollen verfügbaren Volumen und der eingebrachten Menge an Bentonit. Die nach dem Quellen vorliegende Dichte darf nicht so groß sein, dass der resultierende Quelldruck zusammen mit dem Wasserdruck den Gebirgsdruck des Wirtsgesteins erreicht. Die Dichte muss aber so groß sein, dass die Festigkeit des Bentonits ausreicht, um den Endlagerbehälter langfristig in einer zentralen Position zu halten auch bei ungleichförmiger Gebirgsbeanspruchung und/oder ungleichförmiger Wassergehaltsverteilung im Bentonit. Die obere Grenze des zulässigen Quelldruckes hängt von der Tiefenlage des Endlagers ab.

Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Phase der Aufsättigung des Bentonitkörpers Gegenstand vieler internationaler Projekte ist und die zu erwartenden Prozesse aufgrund von chemischen, thermischen, mechanischen und hydrologischen Reaktionen noch intensiv untersucht werden müssen /3-51/.

Nachteilig für Bentonit müssen alle Einflüsse bewertet werden, die seine Quellfähigkeit herabsetzen. Dazu gehören hohe Temperaturen, d.h. $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, welche über längere Zeit wirken, hohe K^+ -Ionen-Gehalte im Verhältnis zur Summe ($\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), die in der Kontaktzone zur Illitisierung (Illit ist kaum quellförmig) des Bentonits führen können und das Vorhandensein gewisser Metallionen, die den Bentonit in andere Phasen umwandeln vermögen. Zusätzlich können hohe pH-Werte, die allenfalls aus der Anwesenheit von Zement entstehen können, ebenfalls nachteilig sein.

Kompaktierter Bentonit mit zugefügten Fe^{3+} -Ionen zeigte einen Anstieg des Quelldruck um 50 % gegenüber reinen Bentonit-Proben. Daraus wird abgeleitet, dass die Quellfähigkeit durch Korrosion nicht negativ beeinflusst wird /3-44/. Thermische (Langzeit-) Behandlung von Bentonit führt bis zu einer Temperatur von $\sim 80^\circ\text{C}$, auch in Anwesenheit von Fe (in Form von Magnetit und/oder Hämatit) zu keinen Änderungen der Textur.

Ein exponentieller Anstieg des Quelldruckes ist in Abhängigkeit von der Bentonittrockendichte zu erwarten. Dabei wird im allgemeinen angenommen, dass unter 1 g/cm^3 und bei Einwirkung gesättigter Salzlösung kein registrierbarer Quelldruck mehr auftritt.

Unter Quellung wird hier die Volumenzunahme eines Tons unter Flüssigkeits- oder Dampfaufnahme verstanden. Das Quellverhalten kann prinzipiell durch zwei unterschiedliche Prozesse erklärt werden. Man unterscheidet zwischen intrakristalliner Quellung /3-43/, /3-53/ die hohe Quelldrücke erzeugt und osmotischer Quellung /3-53/, die auf unterschiedlichen Ionenkonzentrationen zwischen der Porenlösung und dem eingelagerten Wasser beruht.

Die bei der osmotischen Quellung auftretenden Quelldrücke sind wesentlich kleiner als diejenigen, die durch innerkristalline Quellung verursacht werden.

Eng verbunden mit dem Quellverhalten und der Plastizität des Bentonits ist sein Selbstheilungsvermögen. Durch die Ausdehnung der Tonaggregate werden in der Auflockerungszone des angrenzenden Gebirges die Poren, Risse und auch Spalten gefüllt. Ab einer Bentonittrockendichte $>1,8 \text{ g/cm}^3$ wird der ursprüngliche Porenraum durch Wasseraufnahme in den Zwischenschichten vollständig ausgefüllt. Der weitere Wassertransport erfolgt über Diffusion /3-54/.

Schrumpfen

Schrumpfungsprozesse sind Umkehrprozesse der Quellung. Montmorillonite weisen jedoch einige Besonderheiten auf. Laut /3-52/ nimmt zunächst bis zum Erreichen des Wassergehaltes der Schrumpfgrenze das Volumen linear ab, wenn von der Fließgrenze her getrocknet wird. Definitionsgemäß ist die Schrumpfgrenze eines bindigen Bodens derjenige Wassergehalt, bei dem eine Probe im gesättigten Zustand ihr minimales Volumen erreicht. Der Begriff „Schrumpfen“ gilt streng genommen nur für den Bereich oberhalb der Schrumpfgrenze. Bei einem Wassergehalt oberhalb der Schrumpfgrenze erfolgt die Volumenreduzierung allein durch die Abgabe von Porenwasser. Unterhalb der Schrumpfgrenze ist dann die Volumenreduktion weniger stark, da sie durch den Verlust von gebundenem Zwischenschichtwasser erfolgt (Nachschrumpfung). Von besonderer Bedeutung für die Endlagerung ist das Nachschrumpfen, da das Nachschrumpfen von Rissbildung begleitet ist.

Festigkeitseigenschaften

Bei Ton/Bentonit liegt eine extreme Abhängigkeit der mechanischen Parameter vom Wassergehalt bzw. Sättigung des Materials vor. Kennzeichnend für flüssigkeitsgesättigte Bentonite sind ein ausgeprägt plastisches Verhalten und eine geringe Scherfestigkeit. Zum Unterschied von Kaolinit und Illit ist der Zusammenhalt der Schichten im Montmorillonit so schwach, dass Wasser zwischen die Schichten dringen kann (intrakristalline Quellung). Der Zusammenhalt der Schichten im Bentonit nimmt mit der Schichtladung, dem Ionenradius der Zwischenschichtkationen und der Wertigkeit zu und beeinflusst damit auch die Scherfestigkeit und Scherdeformation des Bentonits /3-53/.

Die Plastizitätszahlen hängen beim Bentonit weitgehend von der Kationenbelegung und der Elektrolytkonzentration des Porenwassers ab. Bentonite weisen sehr große Plastizitätszahlen auf. Die Größenordnung der Plastizitätseigenschaften werden durch das Hydratationsvermögen der Zwischenschichtkationen maßgeblich beeinflusst, denn die innere Oberfläche beträgt ein Vielfaches der äußeren. Eine hohe Plastizität garantiert eine langzeitige innere Bruchfreiheit bei gleichzeitigem engem Kontakt mit dem Nachbargestein /3-1/. Da der Endlagerbehälter z. T. direkt auf dem Bentonit liegt, darf aber die Plastizität des Bentonits nicht zu groß sein, damit der mehrere t schwere POLLUX-3-Behälter nicht absinkt.

Für hochkompaktierte und relativ trockene Bentonite ($2,0 \text{ g/cm}^3$ mit 10 % Wassergehalt) beträgt das Elastizitätsmodul bis zu 300 MPa und verringert sich mit der Aufnahme von Wasser /3-55/.

In Bezug auf Trockeneinbau und möglichst hoher Bentonittrockendichte ist auch die Verdichtbarkeit von lufttrockenem Bentonit von Interesse. Ein Problem bei der Verarbeitung von trockenem Bentonitmehl ergibt sich aus dessen extremer Feinkörnigkeit (Montmorillonit $< 2 \mu\text{m}$). Beim Trockenpressen kann eingeschlossene Luft nicht ausreichend entweichen, so dass diese komprimiert wird und sich bei Entlastung wieder ausdehnt. Bei der Herstellung von Bentonitpresslingen führt dies zur Ausbildung von Lagenrissen. Aufgrund der Feinkörnigkeit der Tonpulver und abhängig von der Oberflächenladung sind relativ hohe Verdichtungsenergien ermittelt worden /3-56/.

Fertigung / Einbringtechnologie

Die Fertigung von hochverdichteten Bentonitblöcken erfolgt in einer isostatischen Presse, d. h. in einer Presse, in der der Bentonitblock einem allseitigen hydrostatischen Druck ausgesetzt werden kann. Zur Erzielung einer Trockendichte von $1,8 \text{ g/cm}^3$ sind Pressdrücke von 75 MPa (MX-80 (Na-)Bentonit) bis nahezu 100 MPa (Calcigel, Ca-Bentonit) erforderlich /3-40/.

Gute Ergebnisse zur Herstellung von Briketts (Größe ca. 10 cm³) und Granulaten (0 - 3 mm) wurden mit dem Prinzip der Doppelpressung erreicht. Die größten Einbaudichte ergeben sich bei einem Verhältnis aus 70 bis 80 % Briketts und 20 bis 30 % Granulat und geringen Einbauhöhen. Allerdings wird durch Schüttung des Gemisches nur eine maximale Trockendichte von 1,34 g/cm³ erreicht. Mit Einrütteln der Briketts und anschließendem Füllen der vorhandenen Zwischenräume mit Granulat konnten für ein binäres Gemisch in einem Versuchsschachtverschlussbauwerk Trockendichten von 1,65 – 1,70 g/cm³ erreicht werden /3-57/.

Da in horizontalen Abdichtungen (Streckenabdichtungen) im Bereich der Firste die Möglichkeit des Einrüttelns nicht besteht, können Trockendichten von 1,6 g/cm³ nicht erreicht werden. Der vom Verfüllmaterial ausgehende Quelldruck muss in der Lage sein, Fehlstellen und Imperfektionen auszugleichen, so dass in der Abdichtung keine Fließwege höherer Permeabilität entstehen können.

Erosionsbeständigkeit

Als Erosionsbeständigkeit wird der Widerstand eines Tons gegenüber einer Wasserströmung verstanden /3-58/. Da die Bindungskräfte zwischen den Partikeln quellfähiger Tonminerale größer sind im Vergleich zu nichtquellfähigen Tonmineralen, wird eine generell höhere Erosionsbeständigkeit erwartet.

Bei mit reinem Bentonit verfüllten oder versiegelten Stollen besteht vor allem die Gefahr der Oberflächenerosion. Dabei stellt sich die Frage, ob sich der Bentonit gelartig verhält, oder ob er dispergiert/sich zerlegt. Ferner muss der Möglichkeit von „Piping“ und „Hydraulic Fracturing“ Rechnung getragen werden. Diese Phänomene können die Voraussetzung zu rascher Erosion schaffen /3-40/.

Thermische Eigenschaften

Bentonite haben ungünstige thermische Eigenschaften hinsichtlich der Verwendung zur Verfüllung von Einlagerungsstrecken für radioaktive Abfälle. Die sehr niedrige thermische Leitfähigkeit führt die Wärme, die insbesondere in der Nachbetriebsphase produziert wird, nur langsam ab. Dadurch kann eine unerwünschte hohe Temperatur, Austrocknung und Rissbildung auftreten. Im verdichteten Buffer/Backfill kann unabhängig vom Sättigungszustand die geringe Wärmeleitfähigkeit durch Graphit als Zusatzstoff z.T. kompensiert werden /3-52/.

Eine erhöhte Temperatur bewirkt Strukturänderungen im Bentonit. Nach /3-52/ erfolgt bei einer Erwärmung des Bentonits eine Si⁴⁺-Abgabe, die eine Umwandlung des Smektit in Illit zur Folge hat (Illitisierung). Diese Veränderungen führen nach Experimenten von /3-59/ zu einer Reduktion der Permeabilität.

Hydraulische Eigenschaften

Die hydraulische Leitfähigkeit ist eine komplexe Größe für das System durchströmter Körper – Fluid und ist für Tone in Bezug auf Wasser hinreichend oft bestimmt. Die Permeabilität gegenüber den anstehenden Formationswässern soll so gering sein, dass die Diffusion die maßgebende Transportgröße darstellt /3-52/.

Sowohl Tonstein als Wirtsgestein als auch Bentonit als Barrierematerial haben gegenüber den in einem Endlager zu erwartenden und anstehenden Wässern geringe Durchlässigkeiten und es ist davon auszugehen, dass Diffusion die maßgebliche Transportgröße ist. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von kompaktiertem Bentonit ist $< 10^{-12}$ m/s /3-44/. In gleicher Größenordnung liegen Opalinuston und Tonsteine der Unterkreide, soweit sich dies durch Experimente hinreichend genau ermitteln lässt.

Chemische Eigenschaften

Das Wandern von Ionen durch eine Barriere wird Migration genannt. Die Migration hängt von folgenden Prozessen ab:

- Diffusion von gelösten Ionen im Porenwasser
- Konvektion und Dispersion von gelösten Ionen infolge von Porenwasserströmung
- Sorption, d. h. Austausch von Ionen zwischen Porenflüssigkeit und Festsubstanz.

Die Diffusion und die Konvektion können durch die Sorption in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt werden.

Diffusion

Bentonite sind für Wasser sehr gering durchlässig. Die im Porenwasser gelösten Stoffe werden deshalb kaum advektiv aufgrund des hydraulischen Gradienten, sondern vor allem durch Diffusion aufgrund des chemischen Gradienten fortbewegt. Die Diffusion in kompaktierten Bentoniten ist ein sehr komplexer Vorgang. Das Problem der Beschreibung wird dadurch kompliziert, dass die Diffusion meist von Adsorption begleitet wird.

Von großer Bedeutung für die Diffusion ist der verfügbare Porenraum und der Porenquerschnitt (Porosität) sowie die Verwindung des Porenweges. Im Bereich niedriger Wassersättigung nimmt die hydraulische Diffusivität zunächst mit zunehmender Sättigung ab. Nach dem Erreichen eines Minimums im mittleren Sättigungsbereich steigt die Diffusivität mit zunehmender Sättigung dann an und wird im vollgesättigten Zustand schließlich dann unendlich groß /3-60/. Für den diffusiven Transport steht als maximales Wasservolumen das wassergefüllte Porenvolumen im vollgesättigten Zu-

stand zur Verfügung. Bei niedriger Sättigung ist fast das gesamte Porenwasser in der diffusen Ionenschicht gebunden, weist dort eine größere Viskosität auf und verzögert somit den diffusiven Transport.

Sorption

Für das Rückhaltevermögen im Sinne der Materialanforderungen ist die Sorptionskapazität eine wesentliche Kenngröße. Vor allem die Adsorption von Metallionen (Kationenaustausch) ist maßgebend für die Schadstoffrückhaltung. Das Kationenaustauschvermögen setzt sich aus den negativen Oberflächenladungen der Smektite, den austauschbaren Zwischenschichtkationen und den austauschbaren Kationen an den Rändern der Tonminerale zusammen.

Die Kationenaustauschkapazität beruht darauf, dass die Kationen im Zwischenschichtraum nicht mit dem Kristallgitter verbunden sind. Sie können deshalb gegen andere Kationen an die Lösung abgegeben werden. Die als Kationenaustauschkapazität bezeichnete Summe der austauschbaren Kationen ist vor allem bei smektitischen Tonen aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche beträchtlich.

Es ist zu berücksichtigen, dass alle Zwischenschichtkationen von Smektiten locker gebunden sind und bei Änderung der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung wieder durch Kationen aus der Lösung ersetzt werden können. Um Radionuklide dauerhaft festzuhalten, müssten diese entweder durch die Erhöhung der Schichtladung von Smektit fester im Schichtzwischenraum gebunden sein oder in die kristalline Struktur der Schichtsilikate eingebaut werden. Aufgrund dieser Sorptionseigenschaften sind Smektite potentiell in der Lage, Radionuklide einzulagern und zu binden, bzw. Reaktionen herbeizuführen, welche die Einlagerung von Radionukliden begünstigen.

Chemische Wechselwirkungen mit Formationswässern

Beim Ionenaustausch zwischen dem Bentonit und dem Formationswasser kann dem Wasser Ca entzogen werden, wodurch die Karbonate im Bentonit gelöst werden. Diese Reaktion ist mit einer starken Erhöhung des pH-Wertes begleitet. Bentonit bleibt in alkalischen Lösungen bis zu einem pH-Wert von 12,6 stabil. Bei einem höherem pH-Wert, der z.B. bei der Alteration von Zement in Wasser entstehen kann, beginnen sich die Silikatphasen der Smektite und die K-Feldspäte aufzulösen. Diese Lösungsprodukte können mit anderen Kationen neue Minerale (Zeolithe, AlOOH und Quarz) bilden, welche die endlagerrelevanten, physiko-chemischen Eigenschaften der Bentonite (z.B. Quellvermögen) nicht mehr aufweisen. Eine Temperaturerhöhung beschleunigt diese Prozesse /3-61/.

3.3.3.3 Bentonit-Zuschlagstoff-Gemische

Durch die Vermischung eines mechanisch stabilen Materials (z. B. Quarzsand, kristallines Gestein) mit einem wenig durchlässigen Material (Bentonit) kann versucht werden, einen Verfüllbaustoff mit sowohl günstigen Trag- als auch Dichteigenschaften herzustellen.

Durch die Verwendung von Bentonit – Zuschlagstoff (z. B. Quarzsand) – Gemischen gegenüber reinem Bentonit werden folgende Verbesserungen erzielt:

- Bessere Stütz- und Tragfunktion des Verfüllbaustoffes durch die Verringerung der Kriecheigenschaft
- Erhöhung der Steifigkeit, um eine Annäherung an den im Wirtsgestein herrschenden Spannungszustand zu erreichen
- geringeres Setzungsverhalten
- Verringerung des Schrumpfpotentials
- Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit
- Geringere Kosten

Folgende Nachteile sind dabei zu berücksichtigen:

- erschwerte Verdichtbarkeit
- reduzierte Plastizitätszahlen
- höhere Durchlässigkeit
- geringere Ionenretention

Bei bisherigen Untersuchungen wurde Bentonit in Form von Mehl dem Zuschlagstoff zugegeben. Die Eigenschaften des Gemisches werden durch das Korngerüst bestimmt. Werden kleine Bentonitmengen verwendet, ist der Bentonit aufgrund seiner geringen Partikelgröße in den Poren eingelagert. Bei Erhöhung der Bentonitzugabe lagert sich in Abhängigkeit vom Porenraum der Bentonit auch zwischen den ursprünglichen Kornkontakten des Zuschlagstoffes ein. Nach weiterer Bentonitzugabe sind die Körner des Zuschlagstoffes vollständig von Bentonit umhüllt. Eine gute Packungsdichte wird durch den Einsatz von Zuschlagstoff mit stetiger Sieblinie erreicht. In /3-62/ wird der Einsatz von Dywidag-Mineralgemisch für Schacht- und Streckenverschlüsse sowie für Abdichtungssysteme in den Einlagerungskammern von Untertagedeponien vorgeschlagen. Beim Dywidag-Mineralgemisch handelt es sich um eine Mischung aus Kies 8 bis 32 mm, Sand 0,1 bis 2 mm und Bentonitmehl. Der Bentonitgehalt variiert zwischen 4 und 14 %. Der Kies bildet dabei ein Grobkorngefüge, in welches das Feinkorn (Bentonit-Sand-Mischung) bei Eintrag geringer Verdichtungsenergien einrieseln kann. Die einzubringende Bentonitmenge ist begrenzt, da nur der im Zuschlagstoffgerüst verbleibende Porenraum mit Bentonit ausgefüllt werden soll. Aus der höheren Packungsdichte der Fullerverteilung resultiert ein geringer auszufüllender Porenraum.

Die hydraulische Leitfähigkeit von Bentonit-Sand-Gemischen hängt neben dem Tongehalt, vom Kompaktionsgrad und dem Sättigungszustand ab. Der Zuschlagsstoff (Quarzsand) kann hinsichtlich der hydraulischen Leitfähigkeit als inert betrachtet werden. Die hydraulische Leitfähigkeit ergibt sich aus dem Verhältnis von Bentonit und dem (vom Bentonit zu verfüllenden) Porenraum. Somit ist die hydraulische Leitfähigkeit nicht nur vom Bentonitgehalt sondern wesentlich auch von den strukturellen Eigenschaften des Gemisches abhängig. Merkmale wie Korngrößenverteilung und Packungsdichte bestimmen Porenanteil und -größe und damit die Bentonitverteilung und Bentonitdichte im Gemisch /3-63/.

Die hydraulische Leitfähigkeit von gesättigten Gemischen mit 50 % Bentonit- und 50 % Sandanteil ist geringer als 10^{-12} bis 10^{-13} (m/s). Im trockenen Zustand kann die Leitfähigkeit auf bis zu 10^{-8} (m/s) zunehmen. Durchlässigkeitsversuche von /3-64/ ergaben für Mischungen mit 35 und 45 % Bentonitanteil K-Werte zwischen 2 und 3×10^{-10} m/s, d. h. also vier Zehnerpotenzen höher als für reinen hochverdichteten MX80-Bentonit. Andererseits fand /3-65/ mit Bentonit-Sand-Mischungen zwischen 20 und 70 % bei kleinen Feuchtdichten (Dichte = $\sim 1.0 - 1.2$ g/cm³) ähnliche Durchlässigkeitsbeiwerte wie mit reinem Bentonit. Weiterhin hatte die Sandkomponente eine wohlabgestufte Kornverteilung im Gegensatz zu den Versuchen von /3-64/. Eine bessere Kornabstufung erlaubt eine dichtere Packung und einen geringer auszufüllenden Porenraum, was bei gleichem Bentonitgehalt zu geringeren Durchlässigkeiten führt.

Die thermische Leitfähigkeit von gesättigten Bentonit-Sand-Gemischen nimmt mit dem Sandgehalt zu von ca. 0,8 W/m K für Bentonit auf ca. 1,6 W/m K für ein Gemisch mit 50 % Bentonitanteil.

Für den Erhalt der gleichen Bentonittrockendichte sind Bentonit-Quarz-Mischungen mit wesentlich höheren Verdichtungsenergien notwendig als für reinen Bentonit. Dies ist nicht allein auf die Versteifung durch das Korngerüst der Zuschlagstoffkörner zurückzuführen, da für höhere Bentonitgehalte im Gemisch höhere Verdichtungsenergien nötig sind. Eine mögliche Erklärung dafür ist eine erhöhte Reibung zwischen Quarz- und Bentonitteilchen im Vergleich zum reinen Bentonit.

Bei den Experimenten mit Bentonit-Zement-Versätzen /3-66/, /3-67/, /3-68/, /3-69/ kommt es zu Mineralumwandlungen: der Quarz-Anteil nimmt im Langzeitversuch (16 Monate) um 50 % zu. Andere Veränderungen wie z. B. Neubildung von Illit und Chlorit treten auf, sind aber nicht durchgehend bei allen Proben des Experiments zu finden /3-67/.

3.3.3.4 Betone

Das geochemische Milieu in einem Endlager wird u. a. durch Wechselwirkungen von Wässern und Lösungen mit zementierten Abfällen und durch den Kontakt mit Betonkonstruktionen beeinflusst. Da Beton seit langer Zeit als genormter Baustoff verwendet wird, existieren viele detaillierte Untersuchungen im Zusammenhang mit der Herstellung, Verarbeitung und dem Hydratationsverhalten. Für den Einsatz eines Betons in einem Endlager sprechen folgende Argumente:

- Erreichen von geforderten Festigkeitseigenschaften durch entsprechende Auswahl von Zementtyp, Wasser-Zement- Verhältnis und Zusätzen;
- Großer Umfang verfügbarer Daten bezüglich chemischer und mineralogischer Zusammensetzung sowie der Verarbeitungseigenschaften;
- Vielzahl praktischer Erfahrungen sowie verschiedene anwendungsbereite Einbringungstechniken.

Normalbeton wird in Tonformationen z. B. bei Sondierstollen als Strukturelement in erster Linie als Auskleidungs- und allgemeines Konstruktionsmaterial verwendet. Weiterhin wird Beton/Zement als Mittel zur Fixierung der radioaktiven Abfälle in Endlagerbehältern eingesetzt. Bei einer Verfüllung mit Normalbeton kann es unter hohen Beanspruchungen aufgrund des spröden Verhaltens zu Rissbildungen kommen, so dass eine genügende hydraulische Dichtigkeit kaum gewährleistet werden kann /3-40/.

In einer Nagra-Studie /3-70/ wird als Versiegelungsmaterial der PAC-Beton (PAC = Preplaced Aggregate Concrete, auch Prepakt Beton genannt) vorgeschlagen. Bei dieser Art von Beton werden die Zuschlagsstoffe zuerst platziert, verdichtet und die Poren anschließend mit Zement ausinjiziert. Die hydraulische Durchlässigkeit von PAC-Beton wird in einer Größenordnung von $K = 10^{-11}$ m/s angegeben. Trotz der im Vergleich zu Normalbeton besseren Eigenschaften hinsichtlich Schwinden, Dichte, Druckfestigkeit etc. wird jedoch daraufhin gewiesen, dass die vorhandenen Daten über PAC-Beton noch ungenügend sind.

Der Zutritt von Wasser oder Lösungen in ein Endlager kann zur Veränderung des Zementes führen, was wiederum alkalische Lösungen mit hohen pH-Werten (12.5 - 13.6) hervorruft. In Tonformationen können durch hochalkalische Porenwässer möglicherweise die organischen Komponenten aus dem Ton herausgelöst werden und huminähnliche Materialien bilden.

Laut /3-71/ kommt Smektit als Bestandteil des Versatzmaterials mit alkalischen Lösungen in Kontakt, so lagern sich plättchenförmige Smektitte zu großen Aggregaten zusammen. Der Smektit behält dabei zwar seine Quellfähigkeit, baut aber während seiner Umkristallisation mehr Aluminium in seine Tetraeder-Schicht ein. Die Schichtladung der Smektitte nimmt immer mehr zu und es kommt schließlich zu einem irreversiblen

Kollaps der Schichten. Dieser Kollaps, auch Illitisierung genannt, führt zum irreversiblen Einbau von Kalium. Nach der Bildung von Illit erfolgt die Ausbildung der Zeolite und Phillipsit sowie im Anschluss daran zur Kristallisation von Quarz und Feldspat.

Im Sicherheitskonzept Kristallin-I der Nagra wird darauf hingewiesen, dass auf den Einsatz zementgebundener Werkstoffe möglichst verzichtet wird, um die Eigenschaften des Bentonits möglichst wenig zu beeinträchtigen. Daher wird ein Wirtsgestein mit günstigen felsmechanischen Eigenschaften (wie es im kristallinen Grundgebirge in günstiger Situation erwartet werden kann) einem Wirtsgestein, welches massive Beton- bzw. Stahleinbauten bedarf, vorgezogen.

Störfallszenario Zutritt von Formationswässern

Die Beständigkeit eines Endlagers in Tonstein wird wesentlich durch die geochemischen Reaktionen bestimmt werden, die zwischen dem eingebrachten Abfall, dem Barrierematerial, dem umgebenden Wirtsgestein und den vorhandenen Wässern stattfinden, welche allesamt sich verändernden Temperaturen unterliegen. Wasser, das in verschiedenen Formen (Porenwasser, Formationswasser, kondensierter Wasserdampf) in diese Prozesse eingebunden ist, ist das für die meisten Reaktionen wichtigste Medium. Seine Konstitution und Beweglichkeit sind entscheidend für die langfristige Entwicklung eines Endlagers.

Die qualitative Bewertung der langfristigen Barrierewirkung sowie die Langzeitsicherheit von Endlagern beruht im allgemeinen auf der konservativen Annahme von Störfällen /3-72/. Ein solcher Störfall sieht beispielsweise den Zutritt von Formationswässern vor, die innerhalb kurzer Zeit das Abfallgebäude erreichen. Formationswässer sind salinare Lösungen (Mehrkomponenten- oder Mehrstoffsysteme), die sich weitgehend im chemischen Gleichgewicht mit dem umgebenden Gestein befinden. Die zutretenden Fluide könnten mit den verschiedenen Barrierekomponenten in Wechselwirkung treten, was komplexe Effekte nach sich ziehen würde. Während in der Betriebsphase eines Endlagers ein solches Szenario durch vorbeugende bzw. rechtzeitige technische Maßnahmen verhindert werden kann, so entzieht sich das System nach dem endgültigen Verschluss des Endlagers einer menschlichen Einwirkung. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, bereits im Vorfeld die hydrochemischen Verhältnisse der Formationswässer zu kennen und das Verhalten sowie das Zusammenspiel der gewählten Barrierekomponenten im Störfall unter verschiedenen Bedingungen so genau wie möglich abzustimmen.

In der Nachbetriebsphase eines Endlagers treten Formationswässer mit dem trockenen Bentonit der Verfüllung in Wechselwirkung und es erfolgt eine Sättigung des Bentonits. Die entscheidende Antriebskraft für die Sättigung des Verfüllmaterials ist der negative Kapillardruck in den Poren, der zu einem Adsorbieren von Formationswässern aus dem Wirtsgestein führt. Der Ablauf und die Kinetik dieser Wechselwirkungen bzw.

Aufsättigung werden von der chemischen Zusammensetzung der Formationswässer und den hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins entscheidend mitbestimmt.

3.3.4 Zusammenfassender Überblick über Tonformationen in Deutschland

Im Folgenden wird zusammenfassend dargestellt, welche Tonformation in Deutschland vorhanden sind, die die grundlegenden Voraussetzungen für ein Endlager in Tongestein erfüllen. Eine detaillierte Beschreibung ist in Anlagenband 5 zusammengestellt.

Tone bestehen hauptsächlich aus einem Gemenge von verschiedenen Tonmineralen. Das Verhältnis in dem diese auftreten sowie der Anteil an anderen Mineralen bestimmt die Eigenschaft des Tones und deren große Vielfalt. Nach der Korngrößensystematik klastischer Sedimente kann man plastisch verformbare Tone und Tonsteine wie auch harte, stark konsolidierte Tonsteine, Tonschiefer und Schiefertone als Tongesteine bezeichnen, deren Bestandteile überwiegend der Korngröße $< 2 \mu\text{m}$ angehören.

Plastisch-tonige Sedimente sind meist relativ jung und weisen einen hohen Anteil an Tonmineralien auf. Sie sind für gewöhnlich gering kompaktiert und schwach zementiert. Ihre Gesamtporosität ist hoch. Die stärker konsolidierten Tongesteine weisen dagegen teilweise erheblich geringere Anteile an Tonmineralien auf, zeigen höhere Druckfestigkeiten und damit eine geringere Deformation als die plastischen Tone. Ein weiterer Unterschied zwischen diesen Typen von Sedimentgesteinen ist, dass plastische Tone selbstheilende Klüfte aufweisen, während die stärker konsolidierten Sedimentgesteine häufig offene Kluftnetzwerke zeigen. Wenn in Teilen der Abfolge offene Klüfte festgestellt werden, bedeutet dies jedoch noch nicht unbedingt, dass sie mit Klüften außerhalb dieser Zone in Verbindung stehen.

In den plastischen Tönen ist die maximale Endlagerteufe möglicherweise beträchtlich geringer als in anderen Gesteinen, da die geomechanischen Einschränkungen (geringe Druckfestigkeit und hohe Deformation), die Größe und Tiefenlage der untertägigen Hohlräume begrenzen. Die denkbaren Transportwege vom Endlager in die Biosphäre können daher kürzer sein. Aufgrund der geringen Endlagerteufe können plastische Tone ausschließlich unter geologischen Begebenheiten in Betracht gezogen werden, in denen die Hebungs- und Erosionsvorgänge von untergeordneter Bedeutung sind.

Tone und Tonsteine treten in den verschiedensten stratigraphischen Einheiten des Deckgebirges in Nord- und Süddeutschland auf. Anhand der Voruntersuchungen der Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) /3-73/, /3-74/ kommen für Tonformationen als Wirtsgestein die Unterkreide-Tone im Norddeutschen Becken sowie die Jura-Tone, hier im speziellen der sogenannte Opalinuston, - jedoch regional viel stärker begrenzt - im süddeutschen Molassebecken in Frage. Die Empfehlung des AkEnd für das deutsche Endlagerstandortauswahlverfahren sieht - ausgehend vom gesamten

Gebiet der Bundesrepublik Deutschland - die schrittweise Einengung auf bestimmte Standortregionen an Hand vorher festgelegter Kriterien vor. Seitens der BGR wird dazu ein Screening (Evaluation) durchgeführt, in dem die räumliche Verbreitung, Mächtigkeit und Tiefenlage der benannten Tonformationen (Opalinuston und Unterkreide-Tone) ausgewiesen wird. Eine Benennung von möglichen Endlagerstandorten bzw. eine Standortsuche wurde noch nicht durchgeführt.

Bei der DBE TECHNOLOGY wurden im Rahmen eines FuE-Vorhabens /3-75/ auf Basis aller zugänglichen geologischen Informationen geologische Modelle zur Auslegung von Endlagern in Tonformationen in Deutschland entwickelt. Diese Modelle werden mit thermischen und mechanischen Parametern belegt, um die thermomechanische Entwicklung eines Endlagers für stark wärmeentwickelnde Abfälle in einer Tonformation zu untersuchen.

Grundlage der Modellgenerierung waren die Mindestanforderungen des Arbeitskreises Endlagerung (AkEnd). Diese Mindestanforderungen wurden zur Identifizierung von Gebieten aufgestellt, in denen die geologischen Strukturen die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Teufenlage erfüllen können. Wesentliche Punkte sind im folgenden aufgeführt /3-76/:

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
- Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500 m liegen.

Die in diesem Bericht vorgestellten Verfüll- und Verschleißkonzepte orientieren sich an diesen geologischen Modellen.

3.3.4.1 Opalinuston im süddeutschen Molassebecken

Der Opalinuston wird als ein stark konsolidierter, steifer Tonstein beschrieben, dessen mechanisches Verhalten durch seine interne Struktur (Tonpartikel – Tonminerale und Tonmineralpakete -, Quarzkörner, diagenetischer Zement, Porenraum) und das Porenwasser (Bindungszustand des Wassers, Wassergehalt) charakterisiert wird.

Der Opalinuston ist ein feinkörniges Sedimentgestein (Tonstein), welches in einem flachen Meer vor ca. 180 Millionen Jahren (Dogger α) abgelagert worden ist. Er besteht aus einer relativ monotonen Folge dunkelgrauer, z.T. kalkiger, glimmerreicher, siltiger Tonsteine. Nach den publizierten Daten ist die Tonmineral-Zusammensetzung sehr unterschiedlich: 18-36 % Illit, 6-12 % Chlorit, 10-20 % Kaolinit, 6-12 % Wechsellagerungsminerale Illit/Smectit-Typ, bis zu 2 % Pyrit sowie bis zu 1,6 % organische Be-

standteile. Der freie Wassergehalt (ohne innerhalb der Minerale gespeichertes Wasser) schwankt zwischen 4 und 12 Prozent /3-73/.

Oberflächennah folgt der Ausstrich des Opalinustons dem morphologischen Nordrand der Schwäbisch-Fränkischen Alb mit einer Mächtigkeit zwischen 90 und 140 m. Der Opalinuston fällt sehr gleichmäßig und flach nach SE unter die keilförmig mächtiger werdende Molasse ein. Im Bereich um Ulm werden die Mindestanforderung des AkEnd (Gebirgsüberdeckung von 300 m, Mindestmächtigkeit von 100 m und maximale Tiefenlage von 1.500 m) erfüllt. Dort erreicht der Opalinuston in einer Tiefenlage von ca. 800 m eine Mächtigkeit von 120 m. Die Abbildung 3-41 zeigt die geologische Situation Süddeutschlands und der Molasse-Zone.

Auf Grund der paläogeographischen Entwicklung des Jura in Süddeutschland und der Schweiz gibt es eine sehr ähnliche Entwicklung der Ablagerungsräume des Opalinustons (z. B. Beckentiefe, Faziesentwicklung). In landferneren Bereichen des Opalinuston-Meeres treten grobklastische Sedimente zurück, was im Grenzgebiet Schweiz/Deutschland z. B. den stark unterschiedlichen Quarzgehalt der Bohrungen Benken (landnah, in der Nähe des Abtragungsgebietes Alemannische Inseln, quarzreicher) und Weiach (landfern, ärmer an Quarz) erklären könnte. Der insgesamt nach oben zunehmende Quarzgehalt zeigt, dass die Verfrachtung von grobem Material ins Beckeninnere gegen Ende des Aalenian zunahm.

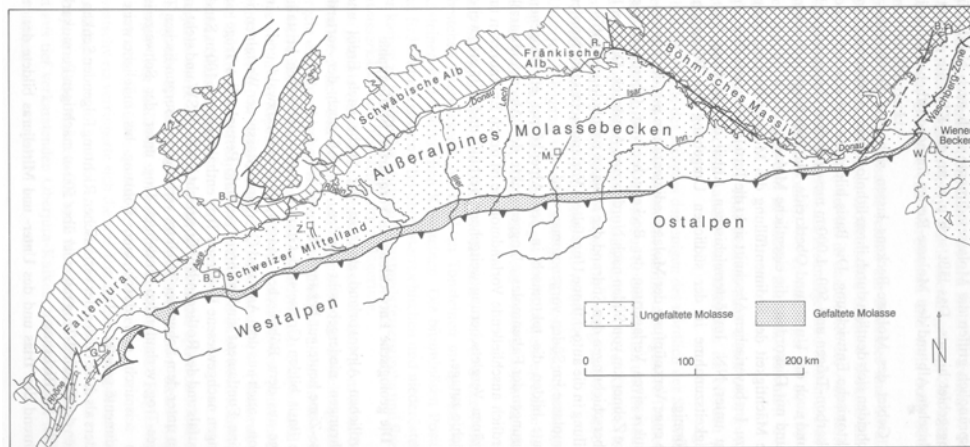


Abbildung 3-41: Geologische Übersichtskarte Süddeutschlands und der Molasse-Zone (Außer-alpines Molassebecken auf dem Gebiet von Deutschland = Süddeutsches Molassebecken) /3-77/

Für den Opalinuston im Bereich um Ulm (Süddeutschland) sind durch die Nähe zum Böhmischem Massiv, dem Hauptliefergebiet für grobklastische Schüttungen, landnahe Ablagerungsverhältnisse zu erwarten, woraus quarzreichere Ablagerungen, wie in der Bohrung Benken (Nordschweiz) festgestellt, zu erwarten sind.

In Süddeutschland ist eine charakteristische Abfolge unterschiedlicher Wassertypen ausgeprägt /3-79/: CaHCO_3 – CaSO_4 – Na_2SO_4 – NaCl , die hydrochemische Zonen repräsentieren:

- bis 300 m: Zone des aktiven Kreislauf – Dominanz von HCO_3^- -Wässern;
- bis 600 m: Zone erschwerter Zirkulation, HCO_3^- und $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ -Wässer stärker Konzentration;
- unter 600 m: Zone stagnierender Wässer mit stark verzögertem Wasseraustausch - hochmineralisierte NaCl -Wässer ($\text{Na-Cl-(SO}_4\text{)}$ -Typ).

Zwischen den Konzentrationen und der Veränderung des hydrochemischen Charakters sowie der Teufenlage besteht eine direkte Abhängigkeit. Die z. T. sehr hohe Salinität der Formationswässer hat ihre Ursache in der Auflösung von Porensalzen bzw. dem Vorhandensein salzhaltiger fossiler Lösungen /3-78/. Abweichungen in der Chemie der Tiefenwässer sind jedoch auf engstem Raum häufig, da die Zusammensetzung des Formationswassers in der Regel eher aus den lokalen engräumigen geologischen Gegebenheiten als aus der großräumigen regionalen Struktur resultieren.

Die geochemischen Bedingungen in Opalinuston sind stabil und reduzierend, so dass die Forderung des AkEnd an eine günstige hydrochemische Voraussetzung erfüllt sind /3-76/.

Im Bereich von Süddeutschland ist nach /3-79/ zu erwarten, dass der chemische Wassertyp des Opalinuston-Porenwassers in einer Tiefenlage von ca. 800 m ein hochmineralisierter $\text{Na-Cl-(SO}_4\text{)}$ -Typ ist. Das in der Bohrung Benken (Nordschweiz) im gering durchlässigen Opalinuston bestimmte Porenwasser ist ebenfalls vom $\text{Na-Cl-(SO}_4\text{)}$ -Typ, wobei die Salinität mit der Tiefe variiert. Im Verfüll- und Verschlusskonzept ist dort als Verfüll-Material der MX-80 (Na-) Bentonit vorgesehen /3-35/.

3.3.4.2 Unterkreide-Tone im Norddeutschen Becken

Die Unterkreide-Tone Norddeutschlands sind größtenteils marine Sedimente, die flächenhaft in einem mehr oder weniger isolierten Randmeer - dem Niedersächsischen Becken (NSB) – abgelagert wurden. Die Abbildung 3-42 zeigt das NSB zur Zeit der Unterkreide. Es ist ein relativ kleines Becken mit einer durchschnittlichen Breite von 80 km und einer Länge von etwa 280 km. Aufgrund unterschiedlicher Sedimentmächtigkeiten und lithologischer Wechsel ist das NSB in einen Westteil, einen Zentralteil und einen Ostteil unterteilt.



Abbildung 3-42: West-, Zentral- und Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens /3-80/

Das Unterkreide-System (Alter: 144 - 99 Millionen Jahre) ist sehr komplex, wie der Ablagerungszeitraum von 45 Mio. a auch erwarten lässt. Die Unterkreide wird in 6 Stufen unterteilt: Wealden, Valangin, Hauterive, Barrême, Apt und Alb.

Die Schichtenfolge ist gekennzeichnet durch eine lückenlose, bis zu 2.000 m mächtige Abfolge von Tonen, untergeordnet Tonsteinen und Mergeln sowie am Beckenrand auftretende Sandsteine. Für jede einzelne stratigraphische Stufe der Unterkreide (Wealden – Alb) konnten Tone nachgewiesen werden, welche die an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich gestellte Mindestmächtigkeit von mehr als 100 m erfüllen. Die Unterkreide-Tone sind südlich der Linie Braunschweig-Peine-Hannover-Neustadt-Rhaden-Bentheim oberflächennah aufgeschlossen und erreichen durch Bohrungen nachgewiesene Teufenlagen von bis zu 2.000 m. In der Literatur werden die Unterkreide-Tone überwiegend als plastisch (soft clay) beschrieben, untergeordnet treten stark konsolidierte Tonsteine und Mergel (stiff clay) auf.

Im Gegensatz zum Opalinuston im Süddeutschen Molassebecken erfüllen die Unterkreide-Tone die Mindestanforderungen des AkEnd in mehreren Teilräumen des NSB. Modelle können in unterschiedlichen Tiefenlagen sowohl für plastische Tone als auch stärker konsolidierte Mergel und Tonsteine entwickelt werden.

Im östlichen Teil des NSB stellt sich die geologische Gesamtsituation am einfachsten dar. Die Unterkreide-Tone halten weiträumig aus und sind von der Geländeoberkante bis in eine Teufe von mehr als 1.200 m aufgeschlossen. Die Schichten lagern horizontal bei einer flachen Topographie. Aus mechanischen Überlegungen (geringerer Überlagerungsdruck) wurde ein Modellstandort ausgewählt, an dem ein stärker konsolidierter, toniger Mergel in einer Tiefenlage von 300 - 400 m aufgeschlossen ist.

Im Norddeutschen Becken umfasst die Konzentration der Tiefenwässer sedimentärer Ablagerungen ein breites Spektrum. Die Wässer sind mehr oder weniger hoch mineralisiert, mit Konzentrationen von 5 g/l bis 600 g/l. Chlorid tritt als vorherrschendes Anion mit einer Konzentration von 10 bis 350 g/l auf.

Die Tiefenwässer der Unterkreide gehören dem Na-Ca-Mg-Cl-Typ an, die Konzentrationen schwanken zwischen 30 und 250 g/l. Die Schichten dieser Komplexes bilden ein einheitliches hydrodynamisches Stockwerk, wobei die wasserführenden Horizonte hydraulisch miteinander verbunden sind. Bei den Anionen dominiert eindeutig das Chlorid. Die Tiefenwässer sind hier ausschließlich als Chlorid-Typ anzusprechen /3-81/.

3.3.5 Verschlusskonzept für Modellendlager im Norddeutschen Becken und im Süddeutschen Molassebecken

In beiden Modellgebieten wurde ein mechanisch stabiler Tonstein/toniger Mergel als Einlagerungshorizont ausgewählt. Insofern gelten für beide Modellendlager ähnliche Randbedingungen hinsichtlich der Auswahl des Verfüll- und Verschlusskonzeptes sowie der entsprechenden Materialien.

Das Grubengebäude ist durch zwei im Deckgebirge ausgebaute und wasserdichte Schächte erschlossen. Die Einlagerungsfelder bestehen aus parallelen Strecken, die von Querschlägen abzweigen. Diese wiederum zweigen von den Haupttransportstrecken, den Richtstrecken ab. Zeitnah zur Einlagerung der Abfälle erfolgt das weitere Auffahren der Zugangs- und Einlagerungsstrecken.

Das Verfüllkonzept sieht eine Einhüllung der Behälter mit Bentonit sowie eine Verfüllung der Strecken mit Bentonit-Sand-Gemischen vor. Der Einbau des Bentonitverfüllmaterials erfolgt jedoch unterschiedlich für die Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern und für die Bohrlochlagerung von HAW-respektive BSK 2-Kokillen. In beiden Fällen werden hochverdichtete, gepresste Bentonit-Bausteine als direkte Umhüllung der Endlagerbehälter verwendet (s. Kap. 3.2.2.4).

Bei der Streckenlagerung werden vorgefertigte ca. 30 cm starke Halbschalen aus Bentonit hergestellt, die zum Einbau vor der Einlagerung von POLLUX-Behältern mittels

perforierter Stahlschale in eine entsprechend ausgefräste Mulde gelegt werden. Zum anderen wird ein eingelagerter POLLUX-Behälter mit der zweiten Bentonit-Halbschale bedeckt. Die Länge der Halbschalen sollte möglichst der des POLLUX-Behälters entsprechen. Im Rahmen weiterer Planungen ist zu prüfen, ob kürzere Elemente handhabungstechnische Vorteile aufzeigen. Dabei ist auch zu prüfen, ob die Stirnflächen der POLLUX-Behälter ebenso mit vorgepressten Bentonit-Formsteinen abzudecken sind, oder ob eine Verfüllung, wie sie für den restlichen Streckenhohlraum vorgesehen ist, ausreicht. Dort ist der Einsatz einer Schüttung aus einem Bentonit-Sand-Gemisch vorgesehen. Die Dimensionierung der 30 cm starken Halbschalen ist durch gezielte Untersuchungen zu belegen. Dabei sind sowohl mechanische, hydraulische und thermische Kriterien als auch fertigungstechnische Aspekte zu berücksichtigen.

HAW- und BSK-2 Kokillen werden in vertikale 50 m tiefe Bohrlöcher eingelagert. Auch hier erhalten die Endlagerbehälter eine umhüllende Bentonitschicht. Mit Blick auf qualitätsgesicherte Eigenschaften in unmittelbarer Behälternahe wird die Bentonitumhüllung aus vorgefertigten, genormten Bentonitringen bereits bei der Herstellung des einzulagernden Gebindes mittels eines perforierten Stahlzylinders um die Kokille gepackt (s. Kap. 3.2.2.4). Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine Bentonitringdicke von 30 cm angenommen. Damit wird die Kokille allseitig mit Bentonit umgeben. Die Endlagerbohrung wird kurzfristig vor dem Beginn der Einlagerung passgenau hergestellt, so dass kein weiterer Ringraum zwischen Bohrlochwand und Endlagergebilde verfüllt werden muss. Der oberste Abschnitt des Bohrloches wird vollständig mit Bentonitblöcken verschlossen. Mit dieser Vorgehensweise soll sichergestellt werden, dass die Kokillen durch quellfähiges Bentonitmaterial gegen zutretende Wässer und Lösungen geschützt sind. Der Bentonit quillt bei Kontakt mit Wässern und Lösungen und wird dadurch weitergehend impermeabel.

Die Strecken über den Bohrlöchern werden wie die Einlagerungsstrecken für POLLUX-Behälter vollständig mit Versatzmaterial aus einem Bentonit-/Sand-Gemisch verfüllt. Das Mischungsverhältnis ist dabei entsprechend den Standortanforderungen im Rahmen weiterer Planungen festzulegen. Zum Einen soll der Sandanteil aus thermischen und mechanischen Gründen möglichst hoch sein, zum anderen soll dieser Anteil aus hydraulischen Gründen möglichst klein bleiben, um eine geringe Permeabilität zu erreichen. Das Material wird mit Transportfahrzeugen in die Strecken gefahren und dort mittels Ladefahrzeugen und Verdichtungsgeräten eingebaut. Besondere Maßnahmen sind für die Verdichtungen im Firstbereich anzuwenden.

Damit definierte Zustände entstehen, die in einem rechnerisch zu führenden Sicherheitsnachweis eindeutig bewertet werden können, und um schädigende Auswirkungen auf die Bentonitumschließung (z. B. Tolerierung einer Opferschicht) zu vermeiden, wurde für die Auslegung die Randbedingung formuliert, dass die Temperatur im Bereich des Bentonits an keiner Stelle 100 °C überschreiten darf (s. a. Kap. 3.2.3).

Aus thermischen Gesichtspunkten kann eine bessere Wärmeleitung durch Einsatz von Zusatzstoffen, z. B. Graphit, erreicht werden. Durch diese sogenannte Graphitisierung des Bentonits kann die notwendige Zwischenlagerzeit eines Behälters reduziert und/oder der Abstand der Behälter zueinander verringert werden. Je nach Optimierungsgrad muss gegebenenfalls der Abstand der Einlagerungsbohrlöcher vergrößert werden, um das Temperaturkriterium einzuhalten. Korrosionsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Anwesenheit von Graphit keinen Einfluss auf die Korrosion von Austenitstahl hat /3-25/.

Eine weitere Reduzierung der Zwischenlagerzeit kann durch eine den Behälter allseitig umschließende Sandschicht und der damit verbundenen Vergrößerung der wärmeabgebenden Kontaktfläche zum Bentonit erreicht werden. In der Sandschicht ist zum Erhalt einer geringen Porosität mit kleinen Porendurchmesser vor allem eine hohe Packungsdichte erforderlich. Kornform, -oberfläche und Korngrößenverteilung beeinflussen die Packungsdichte im wesentlichen Umfang. Bezüglich der Kornform haben gerundete Körner mit glatter Oberfläche beste Voraussetzungen für eine optimale Packungsdichte. Die Packungsdichte eines Einkornsystems kann durch die Anzahl der Berührungspunkte (Koordinationszahl K_z) beschrieben werden. In der Praxis werden in Gleichkorn-Kugelhauwerk maximal 10 % der Kugeln in dichtesten Packungslagen ($K_z = 12$) geordnet sein (d. h. mittlere K_z ca. 8). Die Koordinationszahl eines geschütteten Hauwerkes kann durch direktes Einwirken von Schütteln und Stoßen erhöht werden. Eine weitere Steigerung der Packungsdichte ist durch Kombination verschiedener Einkornsysteme möglich.

Das Schlupfkornprinzip sorgt für hohe Packungsdichten in binären (2 Kornklassen) und ternären (3 Kornklassen) Mischungen. Die Kornklassen werden dabei so gewählt, dass die kleineren Körner jeweils durch die Poren der jeweils größeren Körner „hindurchschlüpfen“ und damit diese ausfüllen können. Für das binäre Gemisch sollte das Durchmesser Verhältnis kleine : große Körner ca. 1 : 50 betragen. Das Verhältnis der Volumenanteile ist abhängig von der Koordinationszahl der großen Körner. Für eine Koordinationszahl von 8 besteht die optimale Mischung aus ca. 70 % grober und ca. 30 % feiner Körner. Damit sind in der Praxis Porositäten von ca. 20 bis 25 % erreichbar /3-63/.

3.3.6 Auswahl der geeigneten Bentonitart

Für einen effektiven Einsatz von Bentonit als Versatzmaterial in der Endlagerung ist es erforderlich, dass das Material über sehr lange Zeiträume (> 10.000 Jahre) /3-82/ stabil bleibt. Innerhalb einer solchen Zeitspanne darf das Versatzmaterial weder seine günstigen, für seine Funktion als Barriere wichtigen Eigenschaften wie Sorptionsfähigkeit oder Abdichtung durch Quellung verlieren, noch durch die herrschenden Umgebungs-

bedingungen wie den Kontakt mit hochkonzentrierten Lösungen nachteilig beeinflusst oder gar zerstört werden.

Die Dauerhaftigkeit des Versatzmaterials hängt von den geochemischen Reaktionen ab, die zwischen dem eingebrachten Abfall, der Verglasung desselben, den Abfallbehältern, dem kompaktierten und losen Barrierematerial, dem umgebenden Wirtsgestein und den vorhandenen Wässern auftreten. Die Entwicklung der Porenwasserchemie in einem Endlager ist von entscheidender Bedeutung für die Vorhersage der Löslichkeiten von Radionukliden, um deren Verhalten beim Auswandern aus dem Endlager in die Umgebung voraussagen zu können. Untersuchungen gehen davon aus, dass die Porenwasserchemie in einem Endlager von der Ausgangszusammensetzung des Bentonites, den Ionen-Eintritt und dem Formationswasserzutritt während der Sättigung und den später stattfindenden Reaktionen zwischen diesen bestimmt wird. Die wichtigsten schnell löslichen Komponenten in natürlichen Bentoniten sind Karbonate und Sulfate zusammen mit Pyrit unter oxidierenden Bedingungen. Ionen-Austauschvorgänge, so wird erwartet, treten zwischen den Kationen im Bentonit und im Wasser auf. Dabei nehmen thermodynamische Modelle an, dass chemische Prozesse so langsam ablaufen, dass sie in Kurzzeit-Laborexperimenten gar nicht in Erscheinung treten.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich Bentonite mit einem hohen Reinheitsgrad an Montmorillonit als Versatzmaterial am besten geeignet sind, da eine Alteration von akzessorischen Mineralphasen in hochkonzentrierten Lösungen zu erwarten ist. Die Alteration kann zu einer Änderung der Lösungsschemie führen, freiwerdende Elemente können mit anderen Komponenten des Barriersystems wechselwirken, was die Vorhersage der Entwicklung des Systems erschwert. Der hohe Montmorillonit-Gehalt verspricht weiterhin eine große absolute Kationenaustauschfähigkeit und sehr gutes Quellvermögen.

In der Literatur werden zwei Bentonite unterschiedlicher Ausgangszusammensetzung beschrieben, der Natrium- (Na-) und Calcium- (Ca-) Bentonit, die im Folgendem gegenübergestellt und hinsichtlich der zu erwartenden Verhältnisse für den Opalinuston in Süddeutschland und die Unterkreide-Tonen im Norddeutschen Becken bewertet werden. Aktivierte Bentonite scheiden auf Grund der nicht nachweisbaren Langzeitstabilität (fehlende Analoga) gegenüber hochmineralisierten Formationswässern aus. Neben der Langzeitstabilität muss auch die Genehmigungsfähigkeit betrachtet werden, daraus resultieren folgende abgeleitete Randbedingungen:

- Die Gesamtmenge des eingesetzten Bentonits muss aus einer Lagerstätte stammen. Es muss sich um eine Handelsprodukt ausreichender Verfügbarkeit und mit gesicherter Qualität handeln.
- Die Lieferfähigkeit in konstanter Qualität muss über lange Zeiträume nachgewiesen werden.

- Das Material muss naturbelassen und ohne künstliche (zusätzliche) Beimengungen sein.

3.3.6.1 Vergleich zwischen Natrium (Na)- und Calcium (Ca)-Bentonit

Die Einflüsse und Veränderungen auf z. B. eine Bentonit-Barriere oder das Wirtsgestein treten mit großer Sicherheit gleichzeitig auf (z. B. Erhöhung des Porenwasserdruckes durch Temperaturerhöhung) Porenwasserdruckanstieg durch Gasentwicklung als Folge der Behälterkorrosion bei paralleler Veränderung des Eh/pH und Änderung der Konzentrationsverhältnisse). Die resultierenden komplexen Bedingungen und Verhältnisse sind bislang in den wenigsten Fällen hinreichend untersucht bzw. bewertet worden.

Es muss daraufhin gewiesen werden, dass das in großem Umfang vorliegende Datenmaterial zur Rheologie, Hydraulik und Stoffretardation von Tonmaterial nicht repräsentativ ist für den Kontakt mit den zu erwartenden, hochmineralisierten NaCl-Lösungen unterschiedlicher Art und unterschiedlichem Mischungsgrad. Die durch NaCl-Lösungen hervorgerufenen Beeinflussungen der Materialeigenschaften, sind im Vergleich mit anderen möglichen Zutrittslösungen (Wasser, MgCl₂-Lösungen im Wirtsgestein Steinsalz), am stärksten ausgeprägt. Daher haben die mit NaCl-Lösungen ermittelten Parameter einen konservativen Charakter.

Hydraulische Leitfähigkeit bzw. Quellung/Schrumpfen

Es gibt aber bisher nur wenig experimentelle Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Formationswässern und Bentonit. Sie beziehen sich ausschließlich auf Na-Bentonit (MX-80). Generell geht man davon aus, dass sich bei Salzwasser im Vergleich zu Reinwasser die hydraulische Leitfähigkeit um ca. eine bis zwei Zehnerpotenzen erhöht. Dies wird auf eine Verringerung der Zwischenabstände zurückgeführt. Bei der Betrachtung der Durchlässigkeit ist im Hinblick auf den untertägigen Einsatz die Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen. Nach /3-83/ ergibt eine Temperatursteigerung von 20 °C auf 70 °C eine 3 bis 7fache Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit, da die Viskosität des Wassers abnimmt und das adsorbierte Wasser beweglicher wird. Im gering verdichteten Zustand und gegenüber Wasser wird einwertiger Na-Bentonit hinsichtlich der osmotischen Prozesse auf Grund der höheren Ionenkonzentration zwischen den Tonteilchen durch einen größeren osmotischen Druck als Ca-Bentonit charakterisiert. Während bei Belegung mit zweiwertigen Kationen die Wasseraufnahme in der Zwischenschicht auf vier Schichten begrenzt ist, können in der Na⁺- belegten Zwischenschicht praktisch beliebig viele Wasserschichten (bis zur Ablösung der Tonplättchen voneinander) eingebaut werden /3-53/. Die dickere Doppelschicht der Na-Bentonite reduziert den Fluidfluss durch den Ton.

Durch die höhere Quellfähigkeit des Na-Montmorillonites ergeben sich höhere Quelldrücke und niedrigere hydraulische Leitfähigkeiten für Na-Bentonit gegenüber Ca-Bentonit (bei vergleichbaren Montmorillonitgehalten). Das Kriterium der minimalen hydraulischen Leitfähigkeit gegenüber Wasser erfüllen Na-Bentonite.

Die Abgabe bzw. Aufnahme von Zwischenschichtwasser der Bentonite ist bis zu einem Temperaturbereich von 200°C reversibel. Bei Na-Bentoniten geht die Quellbarkeit nach einer Dampfbehandlung irreversibel verloren /3-84/. /3-85/ untersuchte den Quelldruck von verdichteten teilgesättigtem Na-Bentonit-Sand-Mischungen nach Dampfbehandlung bei 200 °C und abschließender Abkühlung. Als Ergebnis ergab sich eine Abnahme des Quelldruckes um mehr als eine Größenordnung. Analoge Untersuchungen für Ca-Bentonite liegen nicht vor.

Aus technologischen Gründen wird der Einsatz von hochkompaktierten Bentonitblöcken beim Verfüllen und Verschließen von Bohrungen und Strecken betrachtet. In /3-86/ wurden die Quelldrücke von hochverdichteten MX-80 (Na-) Bentoniten und Calcigel (Ca-Bentonit) mit Trockendichten von $> 1,6 \text{ g/cm}^3$ untersucht. In diesem Verdichtungsbereich weist Ca-Bentonit (trotz kleinerem Montmorillonitgehaltes) gegenüber Na-Bentonit höhere Quelldrücke auf. Bei hoher Verdichtung tritt aufgrund des begrenzten Ausdehnungsvermögens (geringer Porenraum) die osmotische Quellung in den Hintergrund. Die möglichen Quellvorgänge beruhen auf der intrakristallinen Quellung. Da Ca^{2+} und Mg^{2+} höhere Hydratisierungsenergien haben als Na^+ weist in dem Fall Ca-Bentonit auch größere Quelldrücke auf. Aufgrund der höheren Quelldrücke nähert sich die hydraulische Leitfähigkeit des Ca-Bentonits den optimalen Werten des Na-Bentonits an.

Ähnliches ist festzustellen in Bezug auf die Einwirkung von konzentrierten Salzlösungen, die laut /3-79/ in Form einer hochmineralisierten Lösung des Na-Cl-(SO₄)-Typ's zu erwarten ist. Auch hier zeigt Ca-Bentonit höhere Quelldrücke gegenüber Na-Bentonit. Quelldruckuntersuchungen haben ergeben /3-87/, dass bei Einwirkung von konzentrierten Salzlösungen ein Ca-Bentonit gegenüber einem Na-Bentonit höhere Quelldrücke zeigt.

Ca^{2+} als Zwischenschichtkation bewirkt eine höhere Quellung als Na^+ . Bei einem Wassergehalt von 25 % entspricht der Natriumgehalt im Zwischenschichtwasser einer 3 N Salzlösung (175,2 g/l NaCl). Eine gesättigte NaCl-Lösung enthält ca. 350 g/l. Mit zunehmenden Salzgehalt in der Porenlösung verringert sich der Konzentrationsunterschied und damit der Anteil der osmotischen Quellung. Daraus ist ersichtlich, dass gegenüber vollständig (bzw. nahezu) gesättigten Salzlösungen kaum osmotische Vorgänge zu erwarten sind und Quelldrücke sich nur aufgrund der Hydratisierung der Kationen entwickeln können. Systematische Untersuchungen über den Einfluss der Art und der Konzentration von Elektrolyten in den Porenwässern liegen nicht vor. Unab-

hängig von der Art der Porenflüssigkeit ist beim Calcigel (Ca-Bentonit) ein Anstieg des Quelldruckes mit Erhöhung der reduzierten Trockendichte zu verzeichnen.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass Smektite unter Einfluss von salinaren Lösungen eine geringere Quelfähigkeit aufweisen als salzfreie Bentonite. Cl-haltige Porenwässer aus dem Wirtgestein (Formationswässer) können also langfristig einen solchen chemischen Zustand für die Bentonit-Barriere einleiten und quasi in-situ die Quelleigenschaften reduzieren /3-88/.

Bei Calcigel bilden sich viele kleine Risse, während bei SPV Volclay sich wenige breite Risse entwickeln. Durch diese Rissbildung ist eine signifikante Veränderung aller Materialeigenschaften der geotechnischen Barriere zu erwarten /3-52/.

Festigkeitseigenschaften

Durch die deutliche geringere Aufweitung des Schichtabstands im Ca-Bentonit weist dieser über 50 % kleinere Plastizitätszahlen als Na-Bentonit auf /3-52/. Eine hohe Plastizität garantiert eine langzeitige innere Bruchfreiheit bei gleichzeitigem engem Kontakt mit dem Nachbargestein. Ob Na-Bentonit (höchster Plastizitätsindex) oder Ca-Bentonit (hoher Quelldruck, geringe Dispergierung) bevorzugt eingesetzt werden, hängt jeweils von den konkreten Bedingungen ab.

Als Erosionsbeständigkeit wird der Widerstand eines Tones gegenüber einer Wasserströmung verstanden. Wird die Dispersion als Mechanismus der Erosion akzeptiert, so muss berücksichtigt werden, dass Na-Bentonite unter Wasseraufnahme und in salzarmen Lösungen, abhängig vom Grad ihrer Zementation, bis zum vollständigen oder teilweisen Zerfallen (Desintegration) der Smektitteilchen quellen. Ca-Bentonite dispergieren nicht. Daraus kann für letztere eine höhere Erosionsbeständigkeit abgeleitet werden. Auch hohe pH-Werte begünstigen die Dispersion. Die Art und die Konzentration der Kationen sowohl in der Porenlösung als auch im erodierendem Medium hat einen Einfluss auf die Dispersion. Laut /3-55/ neigt der Ton zu Dispersion, wenn die Konzentration von Na und anderer Kationen (Ca, Mg) im Porenfluid hoch ist (60 % der Gesamtkationenkonzentration). Wenn die Kationenkonzentration im erodierenden Fluid hoch ist (hochsalinare Formationswässer), wird die Dispersion durch Segregation der Tonpartikel eingeschränkt.

Chemische Stabilität und Sorption

Wird der Bentonit als Abdichtstoff einer neuen Umgebung ausgesetzt, müssen sich neue Gleichgewichte einstellen. Danach bilden sich unter Langzeitbedingungen durch Kaliumzutritt aus Montmorillonit Illit-Smektit-Wechselagerungen. Dieser Prozess ist beim Ca-Bentonit langsamer als beim Na-Bentonit /3-89/. Für Na-Bentonite besteht

eine bevorzugte Selektivität für K^+ , welche unter bestimmten Bedingungen zu einer Fixierung und letztendlich auch zur Illitisierung von Smektit führen kann /3-53/.

In hochkompaktierten Bentoniten gibt es im Intergranularraum unter Beibehaltung des ursprünglichen Aufbaus der Montmorillonitpartikel ein Bentonitgel, dessen Dichte durch die Porengröße bestimmt wird. Ca-Bentonite haben keine stabile physikalische Form bei Dichten, die tiefer liegen als $1,6 \text{ g/cm}^3$ aufgrund der in Poren bestehenden Möglichkeit der Gelbildung. Ca-Bentonite zeigen keine Quellung bei Einbaudichten unterhalb $1,6 \text{ g/cm}^3$ /3-90/.

Für das Rückhaltevermögen im Sinne der Materialanforderung ist die Sorptionskapazität eine wesentliche Kenngröße. Montmorillonite besitzen eine hohe spezifische Oberfläche sowie hohe Kationenaustauschkapazitäten. Unter Langzeitbedingungen ist ein Ca-Bentonit stabiler. Ein Na-Bentonit wandelt sich bei Zutritt von Ca^{2+} -Ionen in die Ca-Form um /3-91/. Doch auch im Ca-Bentonit können Zwischenschichtionen bei Einwirkung gesättigter NaCl-Lösung ersetzt werden. Dieser Austausch erfolgt aufgrund des Konzentrationsgradienten bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes und ist damit begrenzt /3-63/.

3.3.6.2 Festlegung auf Ca-Bentonit

Die endgültige Materialauswahl (Na- oder Ca-Bentonit) kann nur am konkreten Projekt bzw. Einsatzort und den dort auftretenden Fluiden erfolgen, wobei auch Gesichtspunkte wie Einbau des Materials, dessen Nachbehandlung usw. berücksichtigt werden müssen.

Eine Vielzahl von Experimenten (z. B. Wechselwirkungen zwischen Formationswässern und Bentonit) wurde ausschließlich an Na-Bentoniten durchgeführt. Analoge Untersuchungen an Ca-Bentoniten wurden nicht durchgeführt. Jedoch muss die Frage nach der Eignung von Na- oder Ca-Bentoniten aus gegenwärtiger Sicht bei den zu erwartenden hochmineralisierten, NaCl-dominierten (Süddeutschland) bzw. Na-Ca-Mg-Cl-Formationswasser-Typen (Norddeutschland) zugunsten von Ca-Bentonit ausfallen. Hinsichtlich der Eigenschaften wie Permeabilität und Quellvermögen, Festigkeit, Rückhaltevermögen u.a.m. lässt sich aber feststellen, dass bei den zu erwartenden hydrochemischen Verhältnissen keine großen Unterschiede zwischen Ca- und Na-Bentonit zu erwarten sind, die eine Bevorzugung des einen oder anderen Smektit-Typs rechtfertigt. Viele Eigenschaften dieser beiden Bentonittypen gleichen sich im verdichteten bzw. hochverdichteten Zustand an. Jedoch muss daraufhin gewiesen werden, dass der Ca-Bentonit nur mit einer Einbaudichte von oberhalb $1,6 \text{ g/cm}^3$ zu verwenden ist, da sonst keine signifikante Quellung zu beobachten ist.

Abgesehen davon, dass Na-Smektite in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Ca im Formationswasser (speziell in den Formationswässern Norddeutsches Becken) sowie so in die Ca-Form umgewandelt werden, sind Ca-Montmorillonite nach den vorliegenden Daten chemisch stabiler einzuschätzen. Diese höhere Stabilität scheint wohl unter Bedingungen niedriger als auch höherer pH-Werte gegeben. Weiterhin ist der Prozess der Illitisierung unter Langzeitbedingungen durch Kaliumzutritt und der daraus resultierende Verlust des Quellvermögens beim Ca-Bentonit langsamer als beim Na-Bentonit, da für Na-Bentonite eine bevorzugte Selektivität für K^+ besteht.

Alle in Frage kommende Bentonite werden in Lagerstätten gewonnen und stehen somit ausreichend zur Verfügung. Vorteil des Ca-Bentonits (Calcigel, früher Montigel) ist allerdings, dass dieser in Bayern, in der Gegend von Moosburg und Landshut produziert und vertrieben wird. Der Transportaufwand und die Kosten wären ungleich niedriger als beim Bezug von großen Mengen Na- (MX-80) Bentonit aus Amerika oder Kanada. Dieses könnte auch ein Grund dafür sein, dass in den spanischen, französischen und belgischen Verfüll- und Verschleißkonzepten Ca-Bentonite, die in benachbarten bzw. nationalen Lagerstätten vorkommen, aufgrund der kostengünstigeren Verfügbarkeit betrachtet werden.

3.3.7 Konzept der Streckenverfüllungen und -verschlüsse

Beim Bau eines Endlagers fallen in der Bauphase erhebliche Volumina an Ausbruchmaterial an. Da sicher nicht von einer sofortigen praktischen Verwendung des Ausbruchmaterials als Verschlussmaterial auszugehen ist, stellt die Vorhaltung ein Problem dar. Auf Grund der Zusammensetzung z.B. des Opalinustons ist bei einer Aufhaltung mit schnell fortschreitender Verwitterung an der Luft (zusätzlich Sonneneinstrahlung, Niederschlagswasser usw.) zu rechnen. Im Opalinuston stellen Pyrit und das organische Material die einzigen relativ schnell oxidierbaren und gleichzeitig mengenmäßig signifikanten Bestandteile dar. Es muss durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Qualität des Materials durch die Lagerhaltung nicht allzu stark verschlechtert.

Die drastischen Änderungen der Milieubedingungen, Zufuhr von Luftsauerstoff und Wasser, führen zur Oxidation des Pyrits, der nur unter reduzierenden Bedingungen stabil ist. Dabei entstehen Sulfat-, Eisen- und Wasserstoff-Ionen, die das vorherrschende reduzierende Milieu des Tonsteins nachhaltig verändern. Die Menge an Eisen- und Sulfat-Ionen, die freigesetzt werden, hängt von der Verfügbarkeit von Sauerstoff ab. Um chemisch-physikalische Veränderungen des Tons z.B. durch Auswaschungen zu vermeiden, wären zusätzlich großflächige Auffahrungen unter Tage, ein geeigneter Deponieplatz oder die Errichtung eines Bauwerks für die Lagerung erforderlich. Je nach Einsatzort und den daraus resultierenden Anforderungen an das Material ist eine gewisse Aufbereitung erforderlich, d.h. eine

Zugabe anderer Materialien wie Ton, Bentonit, Quarzsand oder auch eine Zugabe gleichen Materials aber mit definierter Kornabstufung.

Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung des Unterkreide Mergels können derzeit noch nicht gemacht werden. Jedoch müssen in sämtlichen Verwendungsfällen von Ausbruchsmaterial ausgedehnte Vorversuche zur Eignungsklä rung durchgeführt werden. Letztlich ist es eine Frage der Kostenoptimierung, ob ein entsprechend den Anforderungen gelagertes Ausbruchsmaterial oder aber ein entsprechendes Material von einem anderen Abbaustandort verwendet wird.

Im Konzeptvorschlag wird aus technologischen und geochemischen Gründen auf den Einsatz von Wirtsgesteinsmaterial, das bei der Auffahrung anfällt, verzichtet. Die Streckenverschlüsse werden als hydraulische Barrieren sowie als stützender Versatz ausgelegt. Sie sollen in der Lage sein, einen eventuellen Wasserzutritt in den verfüllten Lagerbereich zu verzögern oder was kaum zu erwarten ist, ein Ausfließen potenziell kontaminierter Wässer aus dem Lagerbereich zu verhindern.

In den Einlagerungsstrecken sind schüttfähige Bentonitmaterialien erforderlich. Als Hauptparameter zur Bemessung der Bentonitdichtelemente sind die erforderliche Betonittrockendichte und das notwendige Verhältnis von Länge : Radius des Dichtelements zu nennen. Dabei ist die Dichtereducierung des Bentonits bei möglichem Quellvolumen zu berücksichtigen.

Der Bentonit wird lufttrocken, d. h. ohne Flüssigkeitszugabe eingebaut, um ein nachteiliges Vorquellen auszuschalten. Die Überwachung der Einbauqualität erfolgt hinsichtlich der Einbaufeuchte des Bentonits ($w < 10\%$) und der Trockendichte im gesamten Hohlraumquerschnitt. Auf Grund des Selbstheilungseffektes nach Flüssigkeitszutritt werden Inhomogenitäten und Imperfektionen ausgeglichen /3-87/. Um ungesättigte Bereiche des Bentonitdichtelements vor schlagartigen Belastungsdrücken abzuschirmen, müssen Bentonit-Zuschlagstoff-Gemische vorgeschaltet werden, die im Korngrößenspektrum so abgestuft sind, dass eine stufenweise Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt. Auf diese Weise werden schon bei geringen Flüssigkeitsdrücken gesättigte Bereiche ausgebildet, die als „Schutzschicht“ die reine Betonitdichtung abschirmt. Der Bentonit erhält die Möglichkeit Flüssigkeit aufzunehmen und durch den Quellvorgang die vorhandenen Poren zu schließen. Damit wird eine Aktivierung der Dichtfunktion erreicht /3-57/.

Weiterhin muss aufgrund der Tiefenlage, verstärkt im Konzept für den Opalinuston, auf Bentonit-Quarzsand-Gemische sowie Schotterkiespackungen zurückgegriffen werden. Dadurch wird eine Verbesserung der Stütz- und Tragfunktion durch eine Verringerung des Kriechens gegenüber reinem Bentonit sowie eine Senkung der Kosten erzielt.

Um die Eigenschaften des Bentonits möglichst wenig zu beeinträchtigen, werden wegen potentiell störender Einflüsse zementgebundene Werkstoffe z. B. die Betonauskleidung im Bereich der Verschlüsse beseitigt. Zementierte/betonierte Strukturelemente zum Lastabtrag sind erst in größerer Entfernung zu den Abfallbehältern z.B. in den Zugangs- oder Erkundungstrecken einzusetzen. Ferner wird die Auflockerungszone des unmittelbar anstehenden Fels (Wirtsgestein) auf einer Tiefe von ca. 0.5 – 1.0 m entfernt.

3.3.8 Konzept der Schachtverfüllung und des Schachtverschlusses

Der Schachtverfüllung kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie im Schacht die direkte Verbindung zwischen Endlagerbereich und Biosphäre endgültig und dauerhaft verschließt. Diese Verwahrungssäulen bestehen aufgrund der hydrologischen Verhältnisse und des erforderlichen hohen Sicherheitsniveau generell aus einer oberen Deckgebirgsabdichtung gegenüber Süßwasser und einer unteren Abdichtung im Bereich des Wirtsgesteins gegenüber hochmineralisierten Formationswässern.

Da sich das süddeutsche vom norddeutschen Endlagermodell hinsichtlich der Teufenlage des Wirtsgesteins und in der lithologischen Ausbildungen des Deckgebirges unterscheidet, werden an die Dichtelemente und besonders an den Lastabtrag der Schachtverfüllung abweichende, hohe Anforderungen gestellt. Der Verschluss der Auflockerungszone um den Schacht sowie die Dichtigkeit gegen maximal zu erwartende Gas- und Wasserdrücke in der Endlagerteufe sind weitere wesentliche Aufgabe des Schachtverschlusses. Die Positionierung von Dichtelementen erfolgt zur Verminderung von Auflockerungen zwischen setzungsstabilen Widerlagern, die aus langzeitstabilen Material aufgebaut sind. Auch hier müssen dem Bentonitdichtelement abgestufte Bentonit-Zuschlagstoff-Gemische (mit unterschiedlichen Bentonitgehalten und Bentonittrockendichten) vorgeschaltet werden, um ungesättigte Bereiche des Dichtelementes vor schlagartigen Belastungsdrücken abzuschirmen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass lange Dichtelemente aus trocken eingebautem Bentonit nach Flüssigkeitszutritt durch den sich entwickelnden Quelldruck und die Wandreibung einen Lastabtrag des Dichtelementes gegenüber axialen Flüssigkeitsdrücken entwickeln.

3.3.8.1 Schachtverschluss für das Modell Süddeutsches Molassebecken (Opalinuston)

Die Geologie und Stratigraphie Süddeutschlands ist dank zahlreicher Untersuchungen gut erforscht und dokumentiert. Die regionale Analyse der aus zahlreichen Tiefbohrungen praktisch lückenlos bekannten Gesteinsabfolge zeigt, dass der geologische Auf-

bau dem der Nordschweiz (Untersuchungsgebiet der Nagra) entspricht. Die Jura-Ablagerungen (Opalinuston mit Rahmengesteinen) entstanden in der schwäbischen, generell tonreichen Beckenfazies, die in der Nordschweiz und Süddeutschland dominiert. Die jüngsten Ablagerungen stellen die tertiären Molasseschichten (Sandsteine, Mergel, Tone und Tonsteine) dar, die mit entsprechenden tektonischen Vorgängen der entstehenden Alpen korreliert werden können.

Der Nagra-Konzeptvorschlag für den Schachtverschluss kann aufgrund des fast identischen geologischen Aufbau des Deckgebirges und Wirtsgesteines übernommen werden, jedoch muss in der Auslegung berücksichtigt werden, dass aufgrund der größeren Tiefenlage des Opalinustons in Süddeutschland (ca. 800 m unter Geländeoberkante) abweichende mechanische Verhältnisse zu erwarten sind. Damit spielt der Lastabtrag eine größere Rolle bei der Schachtverfüllung als im Konzept der Nagra.

Für den Schachtverschluss wird ein mehrschichtiges Verschlussbauwerk aus natürlichen Materialien vorgesehen. Zwei Widerlager werden aus Schotterkies mit entsprechenden Übergangsschichten zum Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit hergestellt. Die Widerlager werden zum einen oberhalb der Opalinuston-Formation bis unterhalb des Schachtröhrenfundamentes und zum anderen im Schachtsumpf bis über den Stollenabgang zum Endlager hinaus angeordnet. Die Verfüllung des unteren Widerlagers wird gegen Auslaufen in die vom Schacht abzweigenden Stollen durch entsprechend verdichtete Vorschüttungen gesichert. Zwischen diesen beiden Widerlagern befindet sich ein mehrere Zehnermeter langes Dichtelement aus hochkompaktierten Bentonit. Vor dem Einbau wird eine mögliche Auflockerungszone um die Schachtröhre entfernt und der verbleibende Querschnitt mit Bentonit gefüllt.

3.3.8.2 Schachtverschluss für das Niedersächsisches Becken (Unterkreide Tone)

Die Geologie des östlichen Niedersächsischen Beckens (Bereich des Endlagermodells) und die petrographische Ausbildung der Unterkreide-Schichten ist durch zahlreiche Veröffentlichungen bekannt. Das Wirtsgestein kann als ein toniger Mergel beschrieben werden. Das Deckgebirge bilden ebenfalls überwiegend Mergel sowie untergeordnet plastische Tone.

Durch den geringeren Überlagerungsdruck der aus der Tiefenlage des Endlagermodells von 300 – 400 m resultiert, muss der Schachtverschluss im Vergleich zum Modell Süddeutsches Molassebecken geringeren Belastungen widerstehen, die durch die Konvergenz der Wirtsgesteinsformation und des Deckgebirges hervorgerufen werden. Da die petrographische Ausbildung und damit die Permeabilität des Deckgebirges von der des Wirtsgesteins nicht signifikant abweicht, sind hohe Anforderung an die Dichtigkeit über die gesamte Verfüllsäule des Schachtes gestellt. Aufgrund der zu erwartenden gleichmäßigen, hydrochemischen Verhältnisse über die Gesamtlänge des Schachtes kann eine obere Deckgebirgsabdichtung gegenüber Süßwasser wegfallen. Deshalb wird für den gesamten Schacht eine Verfüllsäule aus speziell abgestuften Calcigel-Granulaten und -Briketts vorgesehen. Zusätzlich ist ein Dichtelement im Bereich des Wirtsgesteins zu erstellen.

Im Rahmen weiterer alternativer Planungen ist zu prüfen, ob die gleiche Abdichtwirkung aus einer Kombination von Schotterkiesschüttung mit Asphalt-/Bitumenfüllung in den Porenräumen und einer Kerndichtung im Endlagerhorizont erreichbar ist.

Eine wirtschaftliche Betrachtung der Alternativen wird dann für eine Entscheidung ausschlaggebend sein.

4 Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton

Im Folgenden werden die Technischen Endlager-Konzepte im Wirtsgestein Salz und Ton verglichen sowie Vorteile und Nachteile dargestellt.

4.1 Bergbau in den Wirtsgesteinen

Der Bergbau im Wirtsgestein Salz ist aufgrund der Standfestigkeit des Gebirges und der einfachen Erstellbarkeit von Strecken und Kammern gut beherrschbar. Je nach Kriechrate sind in größeren zeitlichen Abständen Nachschneidemaßnahmen an den Strecken und Kammern erforderlich, um die erforderlichen Lichtraumprofile einzuhalten.

Bergbau auf Ton in einer für ein geologisches Endlager relevanten Teufe existiert in Deutschland nicht, da abbauwürdige Tonformationen an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden. Eine Untersuchung oberflächennaher Bergwerke bis zu einer Teufe von 80 m zeigte, dass schon dort ein hoher Aufwand für Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen für die Grubenräume erforderlich ist. In der Schachanlage Konrad bei Salzgitter sind Strecken im Ton in größeren Teufen errichtet worden. Es zeigte sich, dass der Ton gegen die Feuchtigkeit der Wetter geschützt werden muss. Hierzu reichen ca. 7 cm Spritzbeton mit leichten Matten zur Stabilisierung aus. Bei ungünstigen geologischen Spannungszuständen, wie bei der Wasserhaltung auf der 1.000 m-Sohle in der Schachanlage Konrad kann ein stahlmattenarmerter, doppel-schaliger Ausbau erforderlich sein. Die durchzuführenden Stabilisierungsmaßnahmen sind im allgemeinen formations- und teufenabhängig. Das Bohren in Ton ist mit über Tage eingesetzter Technik nach entsprechenden Anpassungen auch unter Tage möglich. Für die Einlagerung von Endlagergebinden in Bohrlöchern ist im Gegensatz zum Wirtsgestein Salz eine Bohrlochverrohrung erforderlich.

4.2 Endlagerbehälterkonzepte

Bezüglich der Langzeitsicherheit bestehen Unterschiede bei der Endlagerung in Salz und Ton:

- Im Wirtsgestein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschlusses durch das Salzgestein. Konzeptführend ist hier die Barrierefunktion der (natürlichen) geologischen Barriere und des Schachtverschlusses.
- Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen Barrieren konzeptführend.

Für das Wirtsgestein Ton muss dem gemäß im Unterschied zum Wirtsgestein Salz der Endlagerbehälter für einen sehr langen Zeitraum intakt bleiben, d. h. die Behälter müs-

sen für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmedium sowie dem Gebirgsdruck standhalten.

Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des Bentonits, dessen Quellfähigkeit bei Temperaturen > 100 °C stark eingeschränkt wird, ist es erforderlich, im Wirtsgestein Ton in der Regel die Belademenge der Endlagergebinde zu verringern.

Als weiterer Effekt ist die mögliche Korrosion der Behälter durch auf der Oberfläche abgelagertem Salz aus dem Siedeeffekt von über 100 °C aufgeheizten Formationswässern zu nennen.

Hinsichtlich Materialauswahl und Konstruktion der Endlagerbehälter im Wirtsgestein Ton ergeben sich daraus folgende Aussagen:

- Auf Grund der Temperaturbegrenzung (100 °C) kann nur eine vergleichsweise geringe Beladung des POLLUX-Behälters bzw. der BSK mit gezogenen Brennstäben von ausgedienten Brennelementen erfolgen.
- Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz korrosionsfester Stähle bzw. durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierter Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der dadurch mögliche Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung auf die Endlagersicherheit auswirken kann.
- Bei Einsatz von Brennstabkokillen für die Endlagerung gezogener Brennstäbe ist zu prüfen, ob diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden müssen, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

Daraus kann gefolgert werden, dass die in Deutschland konzipierten Endlagergebinde für Salz grundsätzlich auch in Ton einsetzbar sind.

4.3 Erforderliche Endlagerflächen

Aufgrund der zur Zeit noch nicht bestimmten Abstände der Einlagerungsfelder untereinander bzw. der Nichtberücksichtigung realer Geologien werden die erforderlichen Einlagerungszellen für die Endlagerung in den Wirtsgesteinen Salz und Ton als Basis für eine theoretische Mindestflächenbetragsermittlung genommen und miteinander verglichen. Unberücksichtigt bleiben dabei Flächen für Infrastrukturbereiche und sonstige für den Endlagerbetrieb notwendige bergbauliche Flächen.

Im Wirtsgestein Salz sind unter Zugrundelegung des Mengengerüsts 2002 (vgl. Kapitel 3.2.1) von ca. 1 657 POLLUX-10 entsprechend ca. 2 082 POLLUX-8 mit einer Referenzzwischenlagerzeit von 30 Jahren und einer Einheitszelle von 237 m² eine Endlagerfläche von ca. 0,5 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen mit 15 Jahren Zwischenlagerzeit und einer Einheitszelle von 2 217 m² bei 2156 Kokillen/Bohrloch und insgesamt 4778 HAW-Kokillen eine Endlagerfläche von ca. 0,051 Mio. m². Der gesamte Endlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Streckenlagerung von POLLUX-Behältern und Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen liegt somit bei ca. 0,55 Mio. m².

Im Wirtsgestein Ton sind nach der erforderlichen Umrechnung von 1 657 POLLUX-10 in 5 524 POLLUX-3-Gebinde mit einer Zwischenlagerzeit von 31 Jahren und einer Einheitszelle von 764 m² eine Endlagerfläche von ca. 4,22 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen mit 40 Jahren Zwischenlagerzeit und einer Einheitszelle von 780 m² bei 7 Kokillen/Bohrloch und insgesamt 4 778 HAW-Kokillen eine Endlagerfläche 0,533 Mio. m². Beim Vergleich des Flächenbedarfs für die HAW-Kokillen sind die unterschiedlich langen Zwischenlagerzeiten zu berücksichtigen. Der gesamte Endlagerflächenbedarf für das Konzept Streckenlagerung von POLLUX-Behältern und Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen in Ton liegt somit bei ca. 4,75 Mio. m². In Abbildung 4-1 ist die Gesamtfläche für ein Endlager im Ton dargestellt. In ersten Ansätzen werden dabei auch die bergbaulichen Erfordernisse berücksichtigt, wobei die Größe des Infrastrukturbereichs noch nicht festgelegt wurde.

Als Alternative zur Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern wurde die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen untersucht. Im Wirtsgestein Salz sind unter Zugrundelegung des o. g. Mengengerüsts ca. 5 524 BSK 3 mit einer Referenzzwischenlagerzeit von 10 Jahren bei 54 BSK 3/Bohrloch und einer Einheitszelle von 2 235 m² eine Endlagerfläche von 0,23 Mio. m² erforderlich. Im Wirtsgestein Ton sind nach der notwendigen Umrechnung von 5 524 BSK 3 in 8 286 BSK 2 mit einer Zwischenlagerzeit von 32 Jahren und einer Einheitszelle von 2 165 m² bei 4 BSK 3/Bohrloch eine Endlagerfläche von 4,49 Mio. m² erforderlich.

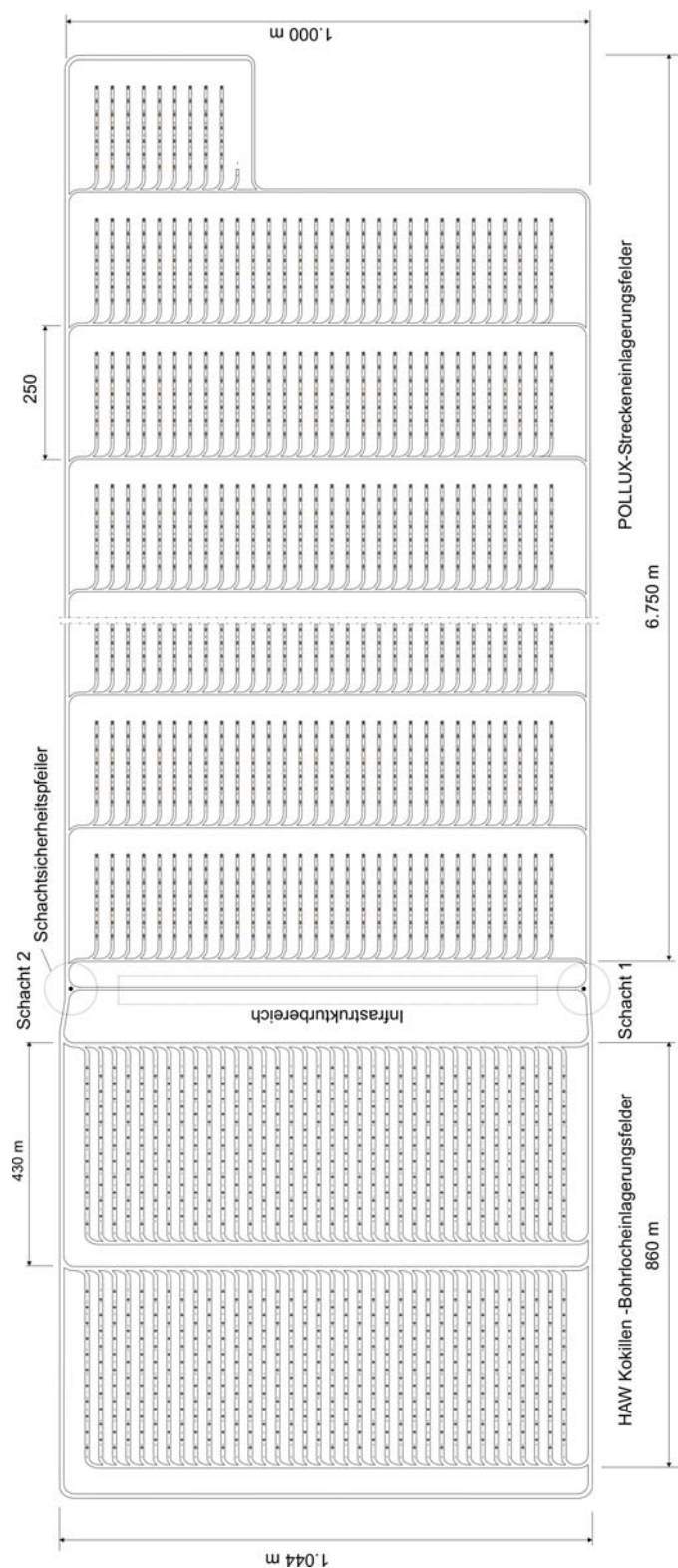


Abbildung 4-1: Endlager in Ton – POLLUX-3 Streckenlagerung und HAW-Kokillen Bohrlochlagerung

Auch hier ist kein direkter Konzeptvergleich möglich, da im Ton die BSK-Kokillen erst nach einer Zwischenlagerzeit von 40 Jahren gegenüber 10 Jahren im Salzkonzept vom Endlager angenommen werden können.

In Abbildung 4-2 ist die Gesamtfläche für ein Endlager im Ton für HAW-Kokillen und BSK 2-Kokillen dargestellt. In ersten Ansätzen sind die bergbaulichen Erfordernisse berücksichtigt, wobei auch dort die Größe des Infrastrukturbereichs noch nicht festgelegt wurde.

Tabelle 4-1 fasst die Ergebnisse zum Endlagerauslegungsvergleich Salz-Ton zusammen. Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur von 100 °C und den geringeren möglichen Bohrlochtiefen ist ein deutlich höherer Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton gegeben.

Endlager- konzept Wirtsgestein	Streckenlagerung		Bohrlochlagerung		
	POLLUX-8	POLLUX-3	HAW-Kokillen	BSK 3	BSK 2
Salz - Endlagerfläche[Mio. m²] - Zwischenlagerzeit [a]	0,5	-	0,051	0,23	-
Ton - Endlagerflächen [Mio. m²] - Zwischenlagerzeit [a]	-	4,22	0,533	-	4,49
	-	31	40	-	32

Tabelle 4-1: Wirtsgesteins- und konzeptabhängig erforderliche Endlagerflächen

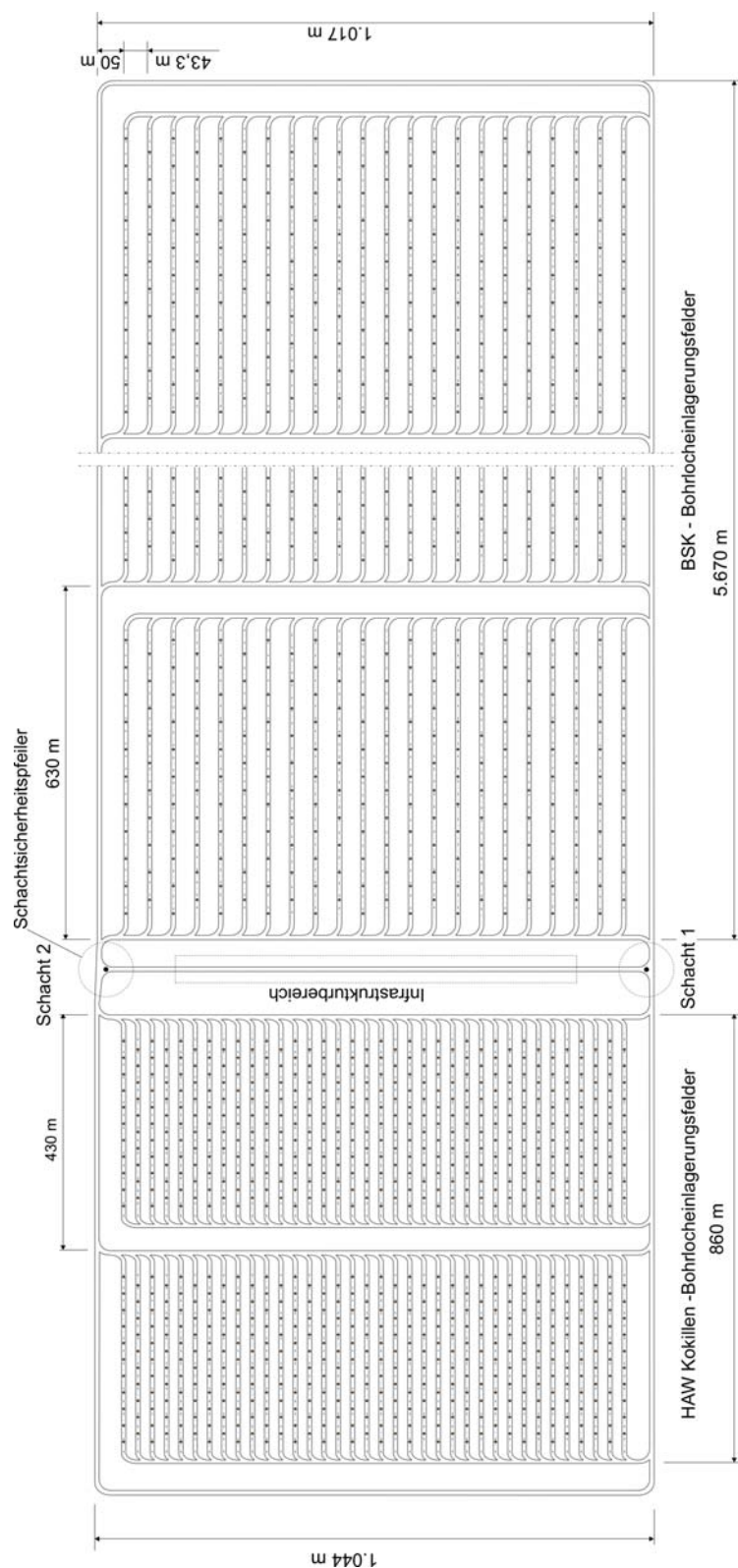


Abbildung 4-2: Endlager in Ton – HAW-Kokillen und BSK-2-Bohrlochlagerung

4.4 Verfüll- und Verschlusskonzept

Ein Vergleich der Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager in Salz und Ton zeigt, dass die wesentlichen Unterschiede in dem Material bestehen, das zur Verfüllung der Strecken und Kammern genutzt wird. Während beim Endlager in Salz das bei der Auffahrung der Strecken anfallende Salzgrus genommen wird, müssen beim Endlager in Ton die Verfüllmaterialien Bentonit und Bentonit/Sand-Gemische separat hergestellt und ins Endlager transportiert werden. Die Einbringtechnologie in Strecken und Kammern dafür unterscheidet sich ebenfalls wesentlich. Salzgrus wird mit entsprechender Fördertechnik (Blas- oder Schleuderversatz) ohne zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen eingebracht. Bentonit und Bentonit/Sand – Gemische müssen mit vorgegebener Einbaudichte qualitätsgesichert in die Strecken und Kammern respektive Bohrlöchern eingebaut werden.

Hinsichtlich der Schachtverfüllung und -verschlüsse sind die Unterschiede deutlich geringer. In beiden Fällen werden setzungsarme Verfüllsäulen aus Hartgesteinsschotter eingebracht, auf die der Schachtverschluss in ähnlicher Auslegung (Widerlager und Dichtelemente) an entsprechender Stelle im oberen Bereich der Wirtsgesteinsformation eingebaut wird.

4.5 Kosten

Ein Kostenvergleich zwischen den Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz und Ton ist aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes beider Konzepte nur relativ möglich. Verglichen werden können die aus den Wirtsgesteineigenschaften und Einlagerungskonzepten entstehenden zusätzlichen Kostenfaktoren.

- **Tagesanlagen**

Für ein Endlager in Ton ist zusätzlich zu den Tagesanlagen, wie sie für ein Endlager im Salz konzipiert wurden, für das Verfüllmaterial Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Gemische ein eigener Logistikstrang zu installieren. Dieser umfasst auch die Herstellung und Lagerhaltung von Bentonitformsteinen für die Streckenlagerung und die Vorbereitung von Endlagergebinden mit Bentonit Umhüllungen.

- **Schachtförderung und Streckentransport**

Für die Schachtförderung und den Streckentransport sind größere Kostenunterschiede zwischen beiden Wirtsgesteinen bei der einzusetzenden Maschinenteknik z. Zt. nicht erkennbar.

– Endlagererrichtung

Der Errichtungs- und Erhaltungsaufwand des Grubengebäudes im Wirtsgestein Ton liegt deutlich über dem im Wirtsgestein Salz. Die Gründe hierfür sind einerseits in den erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen für den Ton und andererseits in der 8 - 9fachen Größe des Grubengebäudes zu sehen. Im Ton ist der Schacht bis in den Schachtsumpf auszubauen. Hierauf kann im Salz verzichtet werden. Dort reicht der Schachtausbau von der Geländeoberfläche bis in den Top des Salzstockes. Ein weiterer Kostenfaktor ist in dem erforderlichen qualitätsgesicherten Einbringen des vergleichsweise teuren Verfüllmaterial Bentonit zu sehen.

5 Literaturverzeichnis

- /1-1/ Engelmann, H.-J. et al: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Systemanalyse Mischkonzept, Abschlussbericht, DEAB T30, Peine, Januar 1990
- /1-2/ Engelmann, H.-J. et al: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, DEAB (02 E 8201), Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB, T59, DBE, Peine, 1995
- /1-3/ Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, Peine, 1998
- /1-4/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Hauptband, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-5/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 1, Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-6/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 3, Sicherheit in der Betriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-7/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 4, Sicherheit in der Nachbetriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-8/ Amelung, P., Kutowski, J.; Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 5, Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-9/ Engelhardt, J., Amelung, P.; Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 6, Geochemie, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004

- /2-1/ Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, Peine, 1998
- /2-2/ Hollmann, A.: Erhebung radioaktiver Reststoffe für das Jahr 1995 - Detaillierte Ergebnisse, Salzgitter, November 1996, ET-IB-89
- /2-3/ Spilker, H.: Status of the Development of Final Disposal Casks and Prospects in Germany, Proceedings DisTec 1998, Hamburg, September 1998
- /2-4/ Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichts über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben vom Mai 1983, Salzgitter, April 1990, ET-2/90
- /2-5/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Rdschr. D. BMI vom 20.04.1983 – RS – AGK3 – 51579/2
- /2-6/ Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung), vom 18. März 1997, BGBl. I S. 542
- /2-7/ J. Krone, N. Müller-Hoeppe: „Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager“, FKZ 02E9087, DBE, Peine, Juni 1999
- /2-8/ ICRP, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, Publication 46, 1985
- /2-9/ Schrimpf, C.: Thermische Simulation der Streckenlagerung. Abschlußbericht zur Phase II, DEAB T37 , Peine, Juli 1991
- /2-10/ Rothfuchs, T.; Feddersen, H.-K.; Kröhn, K.-P.; Wieczorek, K. (GSF) und Poley, A. (ECN): The Debora project Phase II: Development of borehole seals for high-level radioactive waste, Final report, Braunschweig, 1999, GRS 161

- /2-11/ Sitz, P.: Sicherheitsaspekte und Überlegungen für die Planung und den Bau untertägiger Abschlussbauwerke in Deponiebetrieben, aus „Abfallbehandlung, Deponietechnik und Altlastenproblematik“, Hengerer, Nelles & Wöber (Hrsg. 1996 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54108304
- /3-1/ Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd - Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Dezember 2002
- /3-2/ Hoth, P., Schulz, P., Fischer, M., Krull, P. (2002a): Geowissenschaftliche Mindestanforderungen im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Überprüfung der Anwendbarkeit bei Tongesteinsvorkommen in Deutschland; BGR, Berlin.
- /3-3/ Behrens, J.; Fischer, M.: Bergmännische Grundsatzfragen – Wirtsgestein Ton - , DBE – Schachanlage Konrad 2003 – interner Bericht
- /3-4/ Rumpf, K.: Der ehemalige Bergbau in Rheinland-Pfalz und seine heutigen Besucherbergwerke Zeitschrift „Bergbau“ 6 (1996), S. 271 – 276
- /3-5/ Groll, E., Ladnog, U., Toellers, B.: Gewinnungs- und Veredelungstechnologien im modernen Tonbergbau Keramische Zeitschrift 49 (1997), S. 980 – 984
- /3-6/ Diem, W.: Zustandsbericht über die Untersuchungsstrecken, Schacht KONRAD 2. Interner Bericht, Stand: 12.10.1998
- /3-7/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814), Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Gesetz vom 22. April 2002 (BGBl. I S. 1351)
- /3-8/ P. Brennecke, .;K. Kugel; Bundesamt für Strahlenschutz; Abfall radioaktiver Abfälle in Deutschland, Abfallerhebung für das Jahr 2000; BfS-SE 02/04, Salzgitter, April 2004

- /3-9/ Standortunabhängige Einlagerungsplanung auf der Basis der Schachtförderkapazität einer 85 t-Schachtförderanlage, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, Peine, September 2001, unveröffentlicht
- /3-10/ J. B. Grupa and others "Concerted action on retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final Report", EC nuclear science and technology, EUR 19145; 2000
- /3-11/ ONDRAF/NIRAS "Technical overview of the SAFIR 2 report", NIRONND 2001-05 E, December 2001
- /3-12/ B. Kursten, F. Druyts, P. Van Iseghem, „Methodology in corrosion testing of container materials for radioactive waste disposal in a geological clay repository“, Proceedings ASME 2001
- /3-13/ J. Bel, F. Bernier "Temperature criterion related to clay based backfill materials in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (HAW), Proceedings ASME 2001
- /3-14/ ONDRAF/NIRAS "SAFIR 2 Report", NIRONND 2001-06 E; December 2001
- /3-15/ C. Dierick, M. Detilleux, G. Nuyt, L. Janssen, G. Demazy „Synthesis of the technical feasibility evaluation of spent fuel conditioning in Belgium“, Proceedings WM'98, Tucson, März 1998
- /3-16/ McKinley I.G., Russell Alexander W., Integration of TRU disposal studies in Switzerland, Proceedings WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson
- /3-17/ CROP (European Commission's Cluster Repository Project), Country Annex for WP1, Swiss - unveröffentlicht
- /3-18/ www.nagra.ch/englisch/lager/lagerhaa.htm
- /3-19/ Project Opalinus Clay: Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05, Wettingen, 2002

- /3-20/ CROP Project; ANDRA WP1 und WP2; Annexe, 13, August 2001 - unveröffentlicht
- /3-21/ ANDRA 2001, ANDRA, Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, December 2001 - unveröffentlicht
- /3-22/ <http://www.sfen.fr>
- /3-23/ CROP (European Commission's Cluster Repository Project), Country Annex for WP 1, Spain - unveröffentlicht
- /3-24/ B. Kursten, F. Druyts, P. Van Iseghem, „Methodology in corrosion testing of container materials for radioactive waste disposal in a geological clay repository“, Proceedings ASME 2001
- /3-25/ ONDRAF/NIRAS “SAFIR 2 Report”, NIROND 2001-06 E, December 2001
- /3-26/ Cornélis, B., Labat, S., Van Iseghem, P., In Situ Tests on Waste Packages Materials in Clay – concept and performance. Workshop In Situ Testing of Radioactive Waste Forms and Engineered Barriers, Corsendonk, Belgium, 13-16 October, 1992, Report EUR-15629EN, Brussels, CEC, 1993
- /3-27/ E. Smailos, I. Azkarate, J.A. Gago, P. Van Iseghem, B. Kursten, T. McMenamin, “Corrosion Studies on Metallic HLW Container Materials”, Proc. of the 4th European Conf. on Management and Disposal of Radioactive Waste, Luxembourg, 25-29 March 1996, pp. 209-223, T. McMenamin (Ed.), EUR 17543 (1997).
- /3-28/ Smailos, E.; Cunado, M.Á.; Azkarate, I.; Kursten, B.; Marx, G. “Long-Term Performance of Candidate Materials”, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgung, FZKA 6706, Karlsruhe 2002
- /3-29/ Papp R. GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salzgestein und Hartgestein Projektträger des BMBF für Entsorgung Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1997, FZKA - PTE Nr. 3
- /3-30/ Itasca Consultants: FLAC Handbücher, Minnesota, USA, 1997

- /3-31/ ANDRA: Geological Statement Report of the Eastern Site. Report Nr. A RP ADS 99-005, 06/1999
- /3-32/ ANDRA (1997): Underground Research Laboratory East of France – State of knowledge and experimental program. Report 34 p
- /3-33/ Nagra (2002): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Nagra Technischer Bericht (NTB) 02-03, Wettingen, Schweiz
- /3-34/ Nagra (2003): Nagra, 2003 <http://www.nagra.ch/deutsch/lager/lager.htm>
- /3-35/ BENIPA (2001): Overview of disposal concepts for clay and granite. Deliverable D-1 Rev.0
- /3-36/ IAEA – International Atomic Energy Agency (1995): The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111 – F, IAEA, Vienna
- /3-37/ IAEA – International Atomic Energy Agency (05.09.1997): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and of the Safety of Radioactive Waste Management, Vienna
- /3-38/ ÜBEREINKOMMEN (1997): Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung), BGBl Teil II, Nr. 31, S. 1752
- /3-39/ Ontario Power Generation (OPG): Nuclear Waste Management, Report No: 06819-REP-01200-10115-R00, September 2003
- /3-40/ Studer, J., Amman, W., Meier, P., Müller, Ch. & Glauser, E. (1984): Verfüllen und Versiegeln von Stollen, Schächten und Bohrlöchern, NTB 84-33, NAGRA, Baden, Schweiz
- /3-41/ Bucher, F.; Spiegel, U. (1984): Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten. Nagra Technischer Bericht 84-18; Nagra, Schweiz

- /3-42/ Krakau, U. Köckritz, V. & Sitz, P. (1990): Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte; Neue Bergtechnik, 20. Jg., Heft 11

- /3-43/ Müller-Vonmoos, M. & Kahr, E. E. (1983): Geotechnik und Entsorgung. In Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt (ed. K. Jasmund und G. Lagaly), pp. 312-357. Steilkopff Verlag

- /3-44/ Madsen, F.T. (1998): Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. Clay Minerals, Vol. 33, 109-129

- /3-45/ Pusch, R., Muurinen, A., Lehtikainen, J. Bors, J. & Erikson, T. (1999): Microstructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency. Final report. European Commission, Luxembourg

- /3-46/ Melkior et al, (2004): Diffusion of an alkaline fluid through clayey barriers and its effect on the diffusion properties of some chemical species. Applied Clay Sciences, Vol. 26, 99-107

- /3-47/ Tessier, D., Dardaine, M., Beaumont, A. & Jaunet, A.M. (1998): Swelling pressure and microstructure of an activated swelling clay with temperature. Clay Minerals, Vol. 33, 255-267

- /3-48/ Pusch, R., Takase, H. & Benbow, S. (1998): Chemical processes causing cementation in heat-affected smectite - The Kinnekulle bentonite. Technical Report. TR 98-25, SKB Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm

- /3-49/ JNC (2000) H12: Project to establish the Scientific and technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC TN1410, Tokyo, Japan

- /3-50/ García-Gutiérrez, M., Missana, T., Mingarro, M., Samper, J., Dai, Z. & Molinero, J. (2001): Solute transport properties of compacted Ca-bentonite used in FEBEX project. Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 47, 127-137

- /3-51/ SKI (2002): The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Review Statement and evaluation of the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co's RD&D Programme 2001. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), SKI Report 02:33
- /3-52/ Engelhardt, I. (2004): Experimental and Numerical Investigations with Respect to the Material Properties of Geotechnical Barriers; Dissertation der Geowissenschaftlichen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen
- /3-53/ Lagaly G. (1993): Reaktionen der Tonminerale. In Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt (ed. K. Jasmund und G. Lagaly), pp. 89-167. Steinkopff Verlag
- /3-54/ Kahr, G., Kraehenbuehl, F., Müller-Vonmoos, M., Stöckli, H.F. (1986): Wasseraufnahme und Wasserbewegung in hochverdichteten Bentonit. Nagra Technischer Bericht 86 – 14, Nagra, Schweiz
- /3-55/ Meyer, D. & Howard, J.J. (1983): Evaluation of Clays and Clay Minerals for Application to Repository Sealing. Technical Report ONWI-486, Battelle Memorial Institut, Columbus, Ohio
- /3-56/ Bucher, F. ; Jeger, P.; Kahr, G.; & Lehner, J. (1982): Herstellung und Homogenität hochverdichteter Bentonitproben. Nagra Technischer Bericht 82-05; Nagra, Schweiz
- /3-57/ Sitz, P., Gruner, M. & Rumphorst, K. (2003): Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar; Kali und Steinsalz (2003) Nr. 3, S. 6 – 13
- /3-58/ Brenner, R.P. (1988): Bohrlochversiegelung im hochverdichtetem Bentonit mit Eignungsbeurteilung, Nagra Techn. Ber. NTB 88-04, Nagra, Schweiz
- /3-59/ Pusch, R. (2000): On the Effect of Hot Vapor on MX80 Clay; SKB Technical Report TR-00-16, Lund, Sweden
- /3-60/ Hillel, D. (1980): Fundamentals in Soil Physics. Academic Press, London, UK

- /3-61/ Ramírez, S., Cuevas, J., Vigil, R. & Leguey, S (2002): Hydrothermal alteration of "La Serrate" bentonite (Almeria, Spain) by alkaline solutions. Applied Clay Science, Vol. 21, 257-269

- /3-62/ Piepenbreier, G.& Güttler, U. (1992): Anwendungsgebiete für mineralische Abdichtungen im Trockeneinbauverfahren. Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. H.L. Jessberger, Balkema Rotterdam

- /3-63/ Erhardt, K. (2001): Entwicklung und Eigenschaftsuntersuchung von schüttfähigen Bentonit-Zuschlagstoff- und Bentonitgemischen für den untertägigen Einsatz als Dichtmaterial, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg

- /3-64/ Bucher, F.; Jedelshauser, P.; Mayor, P.-A. (1986): Quell-, Durchlässigkeits- und Schrumpfversuche an Quarzsand – Bentonit – Gemischen. Nagra Technischer Bericht 86-13, Nagra, Schweiz

- /3-65/ Schuster, P. (1986): Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von Silt – Sand – Fraktionen, die mit quellfähigen Ton vergütet werden. Dissertation ETH Zürich, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik Nr. 131, Zürich

- /3-66/ Savage, D., Batemann, K., Hill, P., Hughes, L., Midodowski, A., Pearce, J., Rae, E. & Rochelle, L., (1992): Rate and mechanism of the reaction of silicates with cement pore fluids. Applied clay science, Vol. 7, 33 – 45

- /3-67/ Savage, D., Noy, D. & Mihara, M. (2002): Modelling the interactions of bentonite with hyperalkaline fluids. Applied Geochemistry, Vol. 17, 207-223

- /3-68/ Karnland, O. (1997): Cement/Bentonite Interaction - Results from 16 month laboratory tests. Technical Report TR-97-32, SKB Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm

- /3-69/ Gaucher, E.C., Blanc, P., Matray, J.M. & Michau, N. (2004): Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay barrier. Applied Geochemistry, Vol. 19, 1505-1515

- /3-70/ Brenner, R. P., Eppinger, G. & Mettler, K. (1991): Stollenversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis, Nagra Techn. Bericht NTB 91-05, Nagra, Schweiz
- /3-71/ Luckscheiter, B., Kienzler, B. & Bosbach, D. (2004): Literaturstudie zum Korrosionsverhalten von HAW-Gläsern in Ton: Tongestein und Versatz-Material, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7068, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
- /3-72/ Kim, J., Gompper, K. & Geckeis, H. (2001): Forschung zur Langzeitsicherheit der Endlagerung hochaktiver Abfälle. In Radioaktivität und Kernenergie, pp. 118-129; Forschungszentrum Karlsruhe
- /3-73/ Hoth, P., Schulz, P., Fischer, M., Krull, P. (2002a): Geowissenschaftliche Mindestanforderungen im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Überprüfung der Anwendbarkeit bei Tongesteinsvorkommen in Deutschland, BGR, Berlin
- /3-74/ Hoth, P., Wirth, H., Schulz, P., Krull, P. (2002b): Tonformationen in Deutschland als mögliche Barriere- oder Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, BGR, Hannover
- /3-75/ Jobmann, M. & Amelung, P.: Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines Generischen Endlagers im Tongestein: GENESIS, Jahresbericht 2003, Februar 2004
- /3-76/ AkEnd (2001): 2. Zwischenbericht – Stand der Diskussion, pp. 169. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
- /3-77/ Walter, R. (1995): Geologie von Mitteleuropa. Schweizerbart, Stuttgart
- /3-78/ Mühlenweg, U., Brasser, U. & Hertel, U. (1997): Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinen Festgesteinen: Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung, Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS-A-2533
- /3-79/ Hölting, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 121, 19-44

- /3-80/ Kemper, E. (1973): The Valanginian and Hauterivian stages in northwest Germany; In: The Boreal Lower Cretaceous: the proceedings of an International organisation, vol. 5, 327 – 344, Liverpool

- /3-81/ Brasser, Th. & Brewitz, W. (2002): Anwendbarkeit der Indikatoren "teufenabhängige Mineralisation / Salzgehalt" für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "keine oder langsame Grundwasserbewegung", Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS-A-2956

- /3-82/ BMU (2001): Endlagerung radioaktiven Abfalls. In BMU Aktuell. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

- /3-83/ Pusch, R. (1981): Permeability of highly compacted bentonit. SKBF / KBS Teknisk Rapport 81-09, 1981, SKB, Stockholm, Schweden

- /3-84/ Couture, R.A. (1985): Rapid increase in permeability and porosity of bentonite-sand-mictures due to alteration by water vapor. In: Jantzen (Ed.): Scientific Basis for Nuclear Waste Management VIII. Mat. Res. Soc., Vol. 44

- /3-85/ Oscarson, D.W., Dixon, P.A. & Gray, M.N. (1988): Clay longevity studies for the Canadien Nuclear fuel waste Management Program, Workshop on artificial clay barriers for high level waste repositories, Lund

- /3-86/ Bucher, F., Spiegel, U. (1984): Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten, Technischer Bericht, 84-18, Nagra, Schweiz

- /3-87/ Sitz, P., Keßler, J. & Schmidt, W. (1992): Physikalische und chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (Literaturstudie); Nagra-Technischer Bericht/Schweiz 93-37

- /3-88/ Honty, M., Uhlík, P., Sucha, V., Caplovicova, M., Francú, J., Clauer, N. & Biron, A.: Smectite-to-illitealteration in salt-bearing bentonites (The East Slovak Basin). Clays and Clay Minerals, Vol. 52, 533-551, 2004

- /3-89/ Köckritz, V.; Sitz, P.; Behrend, J.; Gruner, M. (1993): Tone, Asphalte, Quellzemente als Materialien für Verschußbauwerke Arbeitsgespräch "Verschußbauwerke für untertägige Hohlräume", Freiberg, 27. und 28. 5. 1993, Manuskript und andere Materialien zu Vorträgen und Diskussionen
- /3-90/ Pusch, R. & Svemar, Ch. (2002): CROP – a project for comparative description of national concepts for disposal of radioactive waste; in: Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Workshop Proceedings, Oxford, UK
- /3-91/ Kokotov, J.A. (1984). Ionenaustauscher und Ionenaustausch; Leipzig

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1:	Strecke im Salz	6
Abbildung 2-2:	Kfz-Werkstatt mit Anker und Netzen	6
Abbildung 2-3:	Beraubung der Firste	7
Abbildung 2-4:	POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter /2-3/	11
Abbildung 2-5:	Brennstabkokille 3 (BSK 3)	12
Abbildung 2-6:	COGEMA-HAW-Kokille	13
Abbildung 2-7:	Wärmeleistung von Uran-Brennelementen über die Zeit mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung bezogen auf tSM	14
Abbildung 2-8:	Feldaufteilung für wärmeentwickelnde Abfälle	27
Abbildung 3-1:	Hauptstrecke Grube Lengemann mit vierteiligen, nachgiebigen Stahlbogenausbau im Ringschluss	31
Abbildung 3-2:	Schachtanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe –343 m) mit Anker-/ Spritzbetonausbau	33
Abbildung 3-3:	Schachtanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe –541 m) mit geschraubten Stahlbögen und Anker-/Spritzbetonausbau in der Firste	34
Abbildung 3-4:	Zweischaliger, bewehrter und wasserundurchlässiger Spritzbetonausbau im Dogger in ca. 1000 m Teufe	35
Abbildung 3-5:	Erstellung der Bohrlöcher in der Bohrlochbeschickungsstrecke	40
Abbildung 3-6:	POLLUX-3-Endlagerbehälter	57
Abbildung 3-7:	Bentonitummanteltes Endlagergebäude HAW-Kokille	58
Abbildung 3-8:	Bentonitummanteltes Endlagergebäude	59
Abbildung 3-9:	Darstellung der Diskretisierung des Modellgebietes (Ausschnitt)	62
Abbildung 3-10:	Modellannahme zur Einlagerungskonfiguration in Strecken sowie geometrische Anordnung	63
Abbildung 3-11:	Wärmeleistung des POLLUX-3-Behälters bzw. der einzelnen Pseudonuklide	66
Abbildung 3-12:	Wärmeleistung des POLLUX-5-Behälters bzw. der einzelnen Pseudonuklide	66
Abbildung 3-13:	Wärmeleistung des POLLUX-8-Behälters bzw. der einzelnen Pseudonuklide	67
Abbildung 3-14:	Maximaltemperatur am heißesten Punkt in Abhängigkeit vom Streckenabstand a_s	69

Abbildung 3-15: Temperatur-Zeit-Verlauf am heißesten Punkt für verschiedene Streckenabstände	69
Abbildung 3-16: Temperatur-Zeit-Verläufe für verschiedene Entfernungen vom Behälter	70
Abbildung 3-17: Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke für POLLUX-3	71
Abbildung 3-18: Transport- und Einlagerungsstrecken POLLUX-3	72
Abbildung 3-19: Endlager für POLLUX-3	73
Abbildung 3-20: Darstellung der Diskretisierung des Modellgebietes (Ausschnitt)	75
Abbildung 3-21: Modellannahme zur Einlagerungskonfiguration in Bohrlöchern sowie deren geometrische Anordnung (schematisch)	76
Abbildung 3-22: Wärmeleistung einer HAW-Kokille bzw. der einzelnen Pseudonuklide	78
Abbildung 3-23: Maximaltemperatur am heißesten Punkt als Funktion der Zwischenlagerzeit	79
Abbildung 3-24: Maximaltemperatur am heißesten Punkt in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand a_b	80
Abbildung 3-25: Temperatur-Zeit-Verlauf am heißesten Punkt für verschiedene Bohrlochabstände	81
Abbildung 3-26: Temperatur-Zeit-Verläufe für verschiedene Entfernungen von der Kokille	82
Abbildung 3-27: Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für HAW-Kokillen	83
Abbildung 3-28: Bohrlochbeschickungsstrecken für HAW	84
Abbildung 3-29: Einlagerungsbereich für HAW-Kokillen	85
Abbildung 3-30: Darstellung der Diskretisierung des Modellgebietes (Ausschnitt)	88
Abbildung 3-31: Modellannahme zur Einlagerungskonfiguration in Bohrlöchern sowie deren geometrische Anordnung (schematisch)	89
Abbildung 3-32: Wärmeleistung der Brennstabkokille bzw. der einzelnen Pseudonuklide	91
Abbildung 3-33: Wärmeleistung der Brennstabkokille BSK 2 bzw. der einzelnen Pseudonuklide	91
Abbildung 3-34: Maximaltemperatur am heißesten Punkt als Funktion der Zwischenlagerzeit für die Behälter BSK 2 und BSK 3	92
Abbildung 3-35: Maximaltemperatur am heißesten Punkt in Abhängigkeit vom Bohrlochabstand a_b	94

Abbildung 3-36: Temperatur–Zeit-Verlauf am heißesten Punkt für verschiedene Bohrlochabstände	95
Abbildung 3-37: Temperatur-Zeit-Verläufe für verschiedene Entfernungen von der Kokille	95
Abbildung 3-38: Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungstrecke und Bohrloch für BSK 2	97
Abbildung 3-39: Bohrlochbeschickungstrecken für BSK 2	98
Abbildung 3-40: Einlagerungsbereich für BSK 2	99
Abbildung 3-41: Geologische Übersichtskarte Süddeutschlands und der Molasse-Zone (Außeralpines Molassebecken auf dem Gebiet von Deutschland = Süddeutsches Molassebecken) /3-77/	128
Abbildung 3-42: West-, Zentral- und Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens /3-80/	130
Abbildung 4-1: Endlager in Ton – POLLUX-3 Streckenlagerung und HAW-Kokillen Bohrlochlagerung	148
Abbildung 4-2: Endlager in Ton – HAW-Kokillen und BSK-2-Bohrlochlagerung	150

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfall aus Wiederaufarbeitung	9
Tabelle 2-2:	Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung nach Gebindealternativen	9
Tabelle 2-3:	Wärmeleistung des Endlagerbehälters POLLUX-10 über die Zeit für DWR-Uran-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung	15
Tabelle 2-4:	Wärmeleistung des Endlagerbehälters BSK 3 über die Zeit für DWR- Uran-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung	16
Tabelle 2-5:	Wärmeleistung einer COGEMA-HAW-Kokille in Abhängigkeit von Abbrand, Wiederaufarbeitung und Verglasung nach Reaktorentnahme des Brennstoffs	16
Tabelle 3-1:	Prognostizierte Abfallgebinde-Volumina für wärmeentwickelnde Abfälle bis zum Jahr 2030	42
Tabelle 3-2:	Gebindeanzahl wärmeentwickelnder Abfälle in Abhängigkeit von der Herkunft	43
Tabelle 3-3:	Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung (POLLUX-3-DWR oder BSK 2) und Anzahl der HAW-Kokillen	43
Tabelle 3-4:	Kenndaten von HAW- und BE-Endlagerbehältern in Belgien, der Schweiz, Frankreich und Spanien	51
Tabelle 3-5:	Chemische Zusammensetzung in Belgien untersuchter Werkstoffe für Endlagerbehälter	52
Tabelle 3-6:	Wärmeleistung der Endlagerbehälter POLLUX-3, POLLUX-5 und POLLUX-8 über die Zeit für Uran-DWR-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung	60
Tabelle 3-7:	Überblick zu den thermischen Materialparametern	64
Tabelle 3-8:	Pseudonuklidspektrum der Behälter POLLUX-3, 5 und 8	65
Tabelle 3-9:	Pseudonuklidspektrum der HAW-Kokille	77
Tabelle 3-10:	Wärmeleistung der Endlagerbehälter BSK 3 und BSK 2 über die Zeit für Uran-DWR-BE mit 50 GWd/tSM und 4 % U_{235} Anreicherung	87
Tabelle 3-11:	Pseudonuklidspektrum der Brennstabkokillen BSK 3 und BSK 2	90
Tabelle 3-12:	Konzeption der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frankreich /3-21/	103
Tabelle 3-13:	Mineralogische Zusammensetzung der Bentonite nach /3-43/	114

Tabelle 3-14:	Übersicht über Mineralogie verschiedener Bentonite	115
Tabelle 4-1:	Wirtsgesteins- und konzeptabhängig erforderliche Endlager- flächen	149

8 Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Endlagerstandorte
API	American Petroleum Institute
BE	Brennelement
BNFL	British Nuclear Fuels
BSK	Brennstabkokille
CSD-C	Colis Standard de Déchets Compactés
DWR	Druckwasserreaktor
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A.
EWN	Energiewerke Nord
FuE	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
FKZ	Förderkennzeichen
FRMII	Forschungsreaktor München II
FU Berlin	Freie Universität Berlin
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GEIST	Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Ton- gestein
GfK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GKN	Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar GmbH
GNS	Gesellschaft für Nuklearservice
HAA	Hochaktive Abfälle
HAP	Hydroxylapatit
HAW	High Active Waste
HLW	High Level Waste
ILW	Intermediate Level Waste
KKW	Kernkraftwerk
KMK	Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich
LLW	Low Level Waste
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
LWR-BE	Leichtwasserreaktor-Brennelemente

MTR2	CASTOR – Behältertyp
NSB	Niedersächsisches Becken
ONDRAF/NIRAS	Organisme national belge des déchets radioactifs et des matière fissiles enrichies
PKA	Pilotkonditionierungsanlage
PVC	Polyvinylchlorid
SCK·CEN	Studiecentrum voor Kernenergie-Centre d'étude de L'Energie Nucléaire
SWR-BE	Siedewasserreaktor-Brennelement
THTR/AVR	Thorium-Hochtemperatur-Reaktor/Arbeitsgemeinschaft Ver- suchsreaktor
TSM	Tonne Schwermetall
U	Uran
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe

9 Verzeichnis der Anlagenbände

- A1 Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton
- A2 Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton
- A3 Sicherheit in der Betriebsphase
- A4 Sicherheit in der Nachbetriebsphase
- A5 Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens
- A6 Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Geochemie -