

Projekt VerSi

Endlagerung im Tonstein

Abschlussbericht zum
Vorhaben 3607R02538
„Untersuchung aktueller
planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver
Abfälle in tiefen geologischen
Formationen“

Entwicklung eines
synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 3:
Endlagerkonzept im Tonstein

Projekt VerSi

Endlagerung im Tonstein

Abschlussbericht zum Vorhaben
3607R02538 „Untersuchung aktuel-
ler planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver Abfälle
in tiefen geologischen Formationen“

Entwicklung eines synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 3:
Endlagerkonzept im Tonstein

F. Peiffer

Dezember 2010

Auftrags-Nr.: 835650

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde lie-
gende FE-Vorhaben 3607R02538
wurde im Auftrag des Bundesmini-
steriums für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit durchgeführt.
Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und
Meinung des Auftragnehmers wie-
der und muss nicht mit der Meinung
des Auftraggebers übereinstimmen.

Kurzfassung

Der vorliegende Teilbericht 3 zum Abschlussbericht „Endlagerung im Tonstein - Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes –“, beinhaltet die Darstellung der Arbeiten zum Vorhaben 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ in Bezug auf die Entwicklung eines Endlagerkonzepts im Tonstein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Projekt VerSi.

Der Bericht gibt den aktuellen Stand bei der Entwicklung eines generischen Endlagerkonzepts für einen synthetischen Tonsteinstandort in Norddeutschland wieder. Das im Rahmen des Projektes VerSi entwickelte Konzept für die Endlagerung im Tonstein berücksichtigt die internationalen Erfahrungen für die Endlagerplanung in Tonstein. Zu nennen ist hier insbesondere das Konzept der Schweiz am Standort Benken. Dieses Konzept wurde für den generischen Tonsteinstandort in Norddeutschland und die abfalltechnischen Randbedingungen in Deutschland weiter entwickelt.

Abstract

This report contains the description of the work in connection with Project 3607R02538 dealing with a repository concept in clay for a repository for heat-generating waste.

The report reflects the current status of the development of a generic repository concept for a synthetic clay site in northern Germany. The concept of final disposal in clay developed as part of the VerSi project takes international experience with planning a repository in clay into account. In this context, the Swiss concept at the Benken site is particularly worth mentioning. This concept was developed further and adapted to the generic clay site in northern Germany and the general waste management conditions in Germany.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Vorgehensweise	1
2	Randbedingungen	3
2.1	Regulative und faktische Grundlagen	3
2.2	Anforderungen an einen Endlagerstandort	4
2.2.1	Grundsätzliche Anforderungen	4
2.2.2	Anforderungen an einen Tonsteinstandort	5
2.3	Sicherheitskonzept	5
2.3.1	Technische Barrieren	6
2.3.2	Natürliche Barrieren	8
2.4	Charakterisierung der Abfälle	9
2.4.1	Abfallarten	9
2.4.2	Abfallmengenprognose	9
2.4.3	Relevante Eigenschaften der radioaktiven Abfälle	12
2.4.3.1	Bestrahlte Brennelemente	12
2.4.3.2	CSD-V	19
2.4.3.3	CSD-C Kokillen	20
2.4.3.4	CSD-B Kokillen	22
2.5	Behälterkonzept	22
2.5.1	Bestehende Konzepte	22
2.5.2	Behälterkonzept für die Endlagerung im Tonstein	23
2.5.3	Abfall-Mengengerüste	27
2.5.4	Korrosion der Abfallbehälter	28
3	Endlagerplanung	29
3.1	Untertägige Anlage	29
3.1.1	HAW-Einlagerungsbereich	32
3.1.2	MAW-Einlagerungsbereich	33
3.1.3	Aufzufahrender Hohlraum	35
3.1.3.1	Grubengebäude	35

3.1.3.2	Schächte	37
3.1.4	Bewetterung	37
3.2	Thermische Eigenschaften im HAW-Einlagerungsbereich	38
4	Endlagerungsbetrieb	40
4.1	Betriebsdauer	40
4.2	Grundzüge des Einlagerungsbetriebes	40
4.2.1	Handhabungsvorgänge über Tage	40
4.2.2	Schachttransport	41
4.2.3	Handhabungsvorgänge unter Tage	42
4.3	Rückbau und Verschlussmaßnahmen im Einlagerungsbetrieb	47
5	Stilllegung / Verschluss des Endlagers	48
5.1	Verfüllung und Abdichtung der Einlagerungshohlräume	48
5.2	Hohlraumvolumen am Ende der Betriebsphase	51
5.3	Verfüllung und Abdichtung von Strecken	52
5.4	Verfüllung des Infrastrukturbereiches	53
5.5	Verfüllung und Abdichtung der Schächte	53
5.6	Metallmassen im Endlager	56
6	Zusammenfassung	58
7	Literatur/Unterlagen	60
	Abbildungsverzeichnis	65
	Tabellenverzeichnis	66
	Abkürzungsverzeichnis	67
	Anhang	68

1 Einleitung und Vorgehensweise

Im Verbundprojekt VerSi soll eine Methodik zum Vergleich von zwei Endlagerkonzepten für wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall entwickelt werden. Die Vorgehensweise baut für das Projekt VerSi auf der Arbeitsthese auf, dass jedes der beiden Endlagerkonzepte für sich genommen unter Berücksichtigung aller Anforderungen genehmigungsfähig ist.

Grundlage für die Ableitung einer Vergleichsmethodik im VerSi-Vorhaben sind zwei Endlagerstandorte. Als einer der zu vergleichenden Standorte wurde zunächst der Standort Gorleben gesetzt, da dieser dem politischen Willen nach mit alternativen Standorten zu vergleichen ist¹. Die Erkundungen am Standort Gorleben begannen Ende der 70er Jahre und die übertägigen Erkundungen des Standortes wurden abgeschlossen. Im Jahr 2000 wurden durch ein Moratorium die untertägigen Erkundungen des Standortes für mindestens 3 Jahre und längstens 10 Jahre unterbrochen. Die Annahme, dass der Standort Gorleben genehmigungsfähig sei, ist eine für das Projekt VerSi verwendete Arbeitsthese wie auch für den alternativen Standort. Der Standort Gorleben und das Endlagerkonzept, welches auf die spezifischen Anforderungen im VerSi angepasst wurde, wird in /GRS 10d/ beschrieben.

Die Wahl des alternativen Wirtsgesteinstyps im Projekt VerSi fiel auf pelitische Gesteine (Tonsteine), die eine wirksame geologische Barriere für eingelagerte radioaktive Abfallgebilde darstellen können. Die pelitischen Gesteine können in plastische und konsolidierte (verfestigte) Pelite unterschieden werden. Plastische Pelite scheiden aufgrund der bergtechnischen Schwierigkeiten, die bei der Auffahrung und Offenhaltung eines Bergwerks zu bewältigen wären, aus. Die Auswahl des alternativen Standorts engt sich damit auf konsolidierten Tonstein ein. Entsprechende Tonsteinformationen sind in Nord- wie auch in Süd-Deutschland bekannt, allerdings wurden die entsprechenden Standorte bisher nicht unter dem Aspekt der Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht. Insofern liegen für einen Tonsteinstandort keine bzw. kaum geologische und hydrogeologische Daten vor. Aufgrund der im Vergleich zum Standort Gorleben schlechteren Datengrundlage für Standorte im Tonstein, wird im Vorhaben

¹ Ein Standortvergleich war zu Beginn des Projektes erklärtes Ziel des Umweltministeriums. Mit Beginn der 17. Legislaturperiode erfolgte ein Paradigmenwechsel, demzufolge zunächst die Erkundung des Standortes Gorleben abzuschließen ist.

3607R02538 ein so genannter synthetischer Tonsteinstandort für den angestrebten Vergleich entwickelt und charakterisiert (siehe Teil 2 in /GRS 10b/).

Unter Berücksichtigung von vorliegenden Studien, u. a. der BGR /BGR 07/, sowie der vom AkEnd vorgeschlagenen Kriterien zur Standortauswahl /AKE 02/ wurde festgelegt, den Tonsteinstandort auf Basis der verfügbaren Datengrundlage zu Unterkreide-tonsteinen in Norddeutschland zu synthetisieren. Der synthetische Tonsteinstandort in Norddeutschland gewährleistet, dass er hinsichtlich seiner zukünftigen geologischen Entwicklung vergleichbaren äußeren Prozessen ausgesetzt sein wird wie auch der Standort Gorleben.

Aufbauend auf dem synthetischen Standort wird im Vorhaben 3607R02538 ein Endlagerkonzept entwickelt, das für die Entwicklung der Vergleichsmethodik eine Grundlage ist. Der Vergleich zweier Endlagerkonzepte erfordert im Hinblick auf die Ableitung einer Vergleichsmethodik einen relativ hohen Detaillierungsgrad für die Endlagerkonzepte. An der Realisierbarkeit des so dargestellten Endlagerkonzeptes dürfen sich, wie einleitend ausgeführt, keine Zweifel ergeben. Um bezüglich der Machbarkeit des Endlagerkonzeptes ein hohes Maß an Sicherheit zu gewährleisten bietet es sich an, sich bei der konzeptionellen Entwicklung eines Endlagerkonzeptes in Tonstein an bereits ausgereiften Konzepten im Ausland, wie z. B. Schweiz oder Frankreich, zu orientieren.

2 Randbedingungen

2.1 Regulative und faktische Grundlagen

Die im VerSi-Vorhaben zu entwickelnde Vergleichsmethodik /GRS 10c/ bezieht sich auf die Endlagerung von mittel- und hochradioaktiven bzw. wärmeentwickelnden Abfällen. Neben den im Atomgesetz (AtG) /ATG 06/ genannten grundsätzlichen sicherheitstechnischen Erfordernissen der Endlagerung radioaktiver Abfälle, die in untergesetzlichen Regelwerken weiter präzisiert werden, sind mit Bezug auf die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle folgende Festlegungen bzw. Randbedingungen relevant:

- Radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung werden im Endlager Konrad endgelagert.
- Das Aufkommen an bestrahlten Brennelementen ist durch die Begrenzung der noch zu erzeugenden Restenergiemengen mit den noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken kalkulierbar.
- Durch das seit dem 01. Juli 2005 bestehende Transportverbot für bestrahlte Brennelemente in das Ausland wurde die Wiederaufarbeitung beendet. Das Aufkommen an wärmeentwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ist damit kalkulierbar und resultiert aus den bis zum 01. Juli 2005 zur Wiederaufarbeitung ins Ausland gebrachten Brennelementen.

Das Sicherheitsprinzip der Endlagerung in Deutschland basiert auf dem Konzept des Konzentrierens und Isolierens ohne die Intention der Rückholung der radioaktiven Abfälle /GRS 07b/. Das heißt, das Endlagerkonzept bzw. die Auslegung des Endlagers wird weder der Rückholung der Abfälle noch der Reversibilität von einzelnen Einlagerungsschritten Rechnung tragen. Ein Widerspruch zu /BMU 09/, wonach die Rückholbarkeit der Abfälle nicht erschwert werden darf, besteht durch den geschilderten Grundsatz nicht.

Aus sicherheitstechnischer Sicht orientiert sich das abzuleitende Endlagerkonzept an

- den Sicherheitskriterien der RSK von 1983 /BMI 83/ und
- den Empfehlungen, die vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte /AKE 02/ abgeleitet wurden.

Bei der Ableitung des detaillierten Endlagerkonzeptes werden Anforderungen und Ergebnisse, wie sie in den Machbarkeitsstudien für ein HAW-Endlager im Tonstein in der Schweiz /NAG 02a/ sowie in Frankreich /AND 05/ abgeleitet wurden, berücksichtigt. Diese international bekannten und überprüften Studien weisen einen hohen Detaillierungsgrad auf.

2.2 Anforderungen an einen Endlagerstandort

2.2.1 Grundsätzliche Anforderungen

Gemäß den Empfehlungen des AkEnd /AKE 02/ bzw. der von der BGR erarbeiteten Tonstudie /BGR 07/ sind die nachfolgend genannten allgemeinen Anforderungen bzw. Ausschlusskriterien für einen Endlagerstandort zu berücksichtigen:

- Die Endlagerregion darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum aufweisen.
- Im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungszonen vorliegen.
- Im Endlagerbereich dürfen die seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in einer Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 (2005).
- In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) muss aus Gesteinen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann.
- Der ewG muss eine Mächtigkeit von mindestens 100 m aufweisen.
- Der Abstand zwischen ewG und der Erdoberfläche muss mindestens 300 m betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1.500 m liegen.
- Der ewG muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt. Für Tonstein ist ein Bereich von mindestens 10 km² erforderlich.
- Der ewG bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein.
- Es dürfen keine Erkenntnisse vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und

Ausdehnung des ewG über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

2.2.2 Anforderungen an einen Tonsteinstandort

Für einen Endlagerstandort im Tongestein können die allgemeinen Anforderungen weiter präzisiert werden (s. Teil 1 in /GRS10b/). Dies betrifft insbesondere die Teufenlage des Endlagers. Das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen setzt generell eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Strecken und Grubenbaue voraus. Die Teufe des Endlagers im Tonstein hat neben anderen Faktoren einen Einfluss auf die Stabilität der Endlagerstrecken und damit auch auf die bergmännische Erschließung bzw. die bergtechnische Machbarkeit eines Endlagers /BGR 07/. Da mit der Teufe der geomechanische Druck und die Spannungen im Gebirge zunehmen, steigt auch der technische Aufwand zur mechanischen Sicherung der aufgefahrenen Hohlräume entsprechend an. Erhebliche zementgebundene Felssicherungsmaßnahmen sind in den Einlagerungsbereichen aufgrund ihrer langzeitsicherheitlichen Relevanz nicht anzustreben, z. B. /NAG 02a/. Die BGR /BGR 07/ stellt in diesem Zusammenhang fest, dass für ein Endlager im Tongestein eine Teufe von über 1.000 m aufgrund der zu erwartenden sehr schwierigen gebirgsmechanischen Verhältnisse vermieden werden sollte.

Zur Vermeidung von Mineralumwandlungen im Tonstein sollte die Temperatur im ewG nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle an keiner Stelle 100 °C überschreiten. In diesem Zusammenhang ist die natürliche Temperatur im ewG zu berücksichtigen, die mit zunehmender Teufenlage des ewG steigt. Nicht zuletzt um eine ausreichende Aufnahmekapazität für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle unter dem Aspekt "Wärmeeintrag in das Gebirge" zu haben, hat die BGR in ihrer Arbeit "Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen" /BGR 06/ nur Tonsteinvorkommen in bis zu 1.000 m Tiefe berücksichtigt.

2.3 Sicherheitskonzept

Das synthetische Endlager für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle wird in einer ca. 450 m tiefen Tonformation durch ein System von gestaffelten passiven Sicherheitsbarrieren (Mehrbarrierenprinzip) realisiert. Das Endlagersystem wird die Isolation der Abfälle über einen Zeitraum von einer Million Jahre bei einer Begrenzung der Individualdosis auf 0,1 mSv pro Jahr in der Biosphäre gewährleisten. Das gestaffelte

System aus Sicherheitsbarrieren beinhaltet sowohl technische als auch natürliche Barrieren. Die Barrieren zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

- Es handelt sich um passiv wirkende Barrieren, d.h. die Barrieren bedürfen nach ihrer Herstellung weder einer Überwachung noch steuernder Maßnahmen.
- Die Barrieren werden durch Sicherheitsfunktionen charakterisiert (s. /GRS 10a/). Die Robustheit des Endlagersystems wird dadurch gekennzeichnet, dass der Ausfall oder das nicht vollständige Wirken einer Sicherheitsfunktion im vorgesehenen Zeitraum durch Sicherheitsfunktionen anderer Barrieren kompensiert wird und das Schutzziel der Endlagerung durch den Ausfall nicht in Frage gestellt wird.

2.3.1 Technische Barrieren

Die erste technische Barriere, die die Freisetzung von Radionukliden verhindert, ist das Abfallgebäude. Das Abfallgebäude umfasst die Teilbarrieren Abfallprodukt und Abfallbehälter.

Der Hohlraum zwischen einem eingelagerten Abfallgebäude und dem Wirtsgestein wird verfüllt. Der Versatz stellt nach dem Abfallgebäude die nächste technische Barriere für aus dem Abfallgebäude freigesetzte Radionuklide dar.

Die Einlagerungskammern werden gegenüber den Einlagerungstranstrecken mit Abdichtbauwerken langfristig abgedichtet. Nach Abschluss des Einlagerungsbetriebes werden die Transport- und Infrastrukturstranken verfüllt. Die Stranken werden schachtnah mit Abdichtbauwerken abgedichtet. Die Tagesschächte selbst werden im Endlagerbereich durch Abdichtbauwerke verschlossen. Die Strankenverfüllungen und die Abdichtbauwerke stellen weitere technische Barrieren dar.

Im Falle der bestrahlten Brennelemente besteht das **Abfallprodukt** aus einer keramischen Matrix (UO_2 - bzw. MOX-Pellets) in einem verschlossenen Hüllrohr. Die Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung sind in eine Glasmatrix eingebunden, die sich in einem dicht verschlossenen Metallbehälter befindet. Die Radioaktivität der Hüllen und Endkappen aus der Wiederaufarbeitung ist an diese Strukturteile (Zirkaloy) gebunden. Die Metallstücke befinden sich in kompaktierter oder zementierter Form in einem geschlossenen Metallbehälter. Die Behälter, die hier im Zusammenhang mit den Abfallprodukten genannt werden, sind Bestandteil des Abfallproduktes. Diese sind von den nachfolgend beschriebenen Abfallbehältern (Endlagerbehälter) zu unterscheiden.

Das Abfallprodukt weist folgende sicherheitsbezogene Eigenschaften auf:

- Definierte radiologische sowie physikalische und chemische Eigenschaften
- Homogene Verteilung und Fixierung der Radionuklide in der Matrix
- Niedrige Glaskorrosionsrate bzw. Auflöserate der Brennstofftabletten und Hüllrohre
- Ableitung der erzeugten Wärme

Die bestrahlten Brennelemente sowie die HAW-Kokillen (verglaste Abfälle), werden in **Endlagerbehältern aus Stahl** endgelagert. Die Kokillen mit den technologischen Abfällen aus der Wiederaufarbeitung werden in **Endlagerbehältern aus Beton** endgelagert.

Die Endlagerbehälter weisen folgende sicherheitsbezogene Eigenschaften auf:

- Schutz des Abfallprodukts vor geomechanischen und geochemischen Einflüssen
- Verminderung der Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfallprodukt
- Korrosionsprodukte stellen ein günstiges chemisches Milieu ein
- Korrosionsprodukte binden Radionuklide
- Ableitung der erzeugten Wärme
- Die Integrität der Abfallbehälter und damit die Verhinderung einer Radionuklidfreisetzung ist für einen Zeitraum von mehr als 500 Jahren /BMU 09/ gewährleistet.
- Im Hinblick auf die mechanische Stabilität weisen die Behälter eine Standzeit von mehr als 10.000 Jahren auf /NAG 03/.

Als **Versatzmittel**, das die Abfallgebinde unmittelbar am Endlagerort umschließt, ist Bentonit und ggf. Mörtel vorgesehen.

Das Versatzmaterial weist folgende sicherheitsbezogene Eigenschaften auf:

- Schutz des Abfallgebundes vor geomechanischen und geochemischen Impacts
- Begrenzung von Auflockerungszonen
- Plastizität (Selbstabdichtung nach physikalischer Störung) /NAG 03/
- Transportbarriere für aus dem Abfallgebinde freigesetzte Radionuklide /NAG 03/
- Niedrige Transportraten für gelöste Stoffe (Diffusion)
- Verzögerung des Radionuklidtransports (Sorption)
- Niedrige Radionuklidlöslichkeit im Porenwasser

- Ableitung der von radioaktiven Abfällen erzeugten Wärme

Die Einlagerungsbereiche werden nach ihrer vollständigen Beladung mit **Abdichtbauwerken** gegenüber der Einlagerungstranstrecke verschlossen. Der Verschluss bzw. die Abdichtung erfolgt unmittelbar gegen das anstehende Tongestein.

Die Abdichtbauwerke weisen folgende sicherheitsbezogenen Eigenschaften auf:

- Homogener Übergang vom Tonstein auf das Abdichtbauwerk
- Vermeidung von Auflockerungszonen im Bereich der Abdichtung
- Die chemischen und physikalischen Kennwerte des Abdichtbauwerks sind vergleichbar mit den qualitativen und quantitativen Eigenschaften des Wirtsgesteins
- Mechanische Stabilisierung der Einlagerungsbereiche gegen die offenen Einlagerungstranstrecken über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten
- Ableitung der von den radioaktiven Abfällen erzeugten Wärme

2.3.2 Natürliche Barrieren

Die natürlichen Barrieren werden durch die Geologie des so genannten Nah- und Fernfeldes gebildet, die die technischen Barrieren umschließen. Von zentraler Bedeutung ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich (**ewG**), der das Isolationspotenzial für die eingelagerten Abfälle aufbringt.

Der ewG weist folgende sicherheitsbezogenen Eigenschaften auf:

- Schutz der technischen Barrieren vor äußeren Einwirkungen
- Im Bereich des ewG befinden sich keine wasserführenden Systeme
- Transportbarriere für Radionuklide aus dem ewG in das Deckgebirge
- Ableitung der von den radioaktiven Abfällen erzeugten Wärme

Soweit der die Abfallgebände aufnehmende Tonkörper deutlich über den ewG hinausgeht, stellt dieser Bereich eine zusätzliche passive und ergänzende Barriere zum ewG dar. Diese Barriere weist die gleichen Sicherheitsfunktionen auf wie die geologische Barriere des ewG.

2.4 Charakterisierung der Abfälle

2.4.1 Abfallarten

In das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle werden hoch- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Die hochradioaktiven Abfälle sind stark wärmeentwickelnd. Zu diesen Abfällen gehören:

- Bestrahlte Brennelemente
- Verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V)

Bei den mittelradioaktiven Abfällen (schwach wärmeentwickelnd) handelt es sich insbesondere um:

- Kompaktierte Hülsen und Endkappen von Brennelementen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C)
- Verglaste Prozessabfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B)

Die Notwendigkeit der Einlagerung von kleineren Mengen an vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, die z.B. aufgrund ihres Nuklidinventars nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können, ist für ein zukünftiges Endlagerkonzept grundsätzlich zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die radioaktiven Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren sowie die radioaktiven Abfälle aus den Anlagen in Greifswald und Rheinsberg. Für die Entwicklung einer Methode zum Vergleich von zwei Endlagerkonzepten werden die genannten Abfälle nicht berücksichtigt.

2.4.2 Abfallmengenprognose

Der Bestand und das Aufkommen an radioaktiven Abfällen werden vom BfS regelmäßig erhoben. Auf Basis dieser Erhebung wird eine Prognose für den Abfallbestand für das Jahr 2040 abgeleitet, wobei sich die prognostizierte Menge der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle nach dem Jahr 2030 nicht mehr wesentlich ändern wird. Zu dieser Zeit wird der Ausstieg aus der Kernenergienutzung faktisch vollzogen sein.

U.a. mit Bezug auf das so genannte Pollux-Referenzkonzept werden vom BfS /BFS 06/ die in Tabelle 2.1 dargestellten Abfallvolumina für wärmeentwickelnde Abfälle angegeben. Für die bestrahlten Brennelemente ist zu berücksichtigen, dass sich die Volumenangaben auf die in Polluxbehälter konditionierten Brennelemente beziehen.

Tab. 2.1 Prognose der Abfallgebinder volumina für wärmeentwickelnde Abfälle für das Jahr 2040 /BFS 06/

Abfallart	Menge [m³]
Glaskokillen	ca. 770
CSD-C Kokillen, 560 l Fässer	ca. 950
Bestrahlte Brennelemente (DWR + SWR)	ca. 18.000
Bestrahlte Brennelemente (FR)	ca. 130
THTR / AVR - Brennelemente	ca. 2.000
SUMME	ca. 22.000

Aus /GRS 07a/ ergeben sich bezogen auf eine Abfallerhebung, die in Tabelle 2.2 genannten Stückzahlen für wärmeentwickelnde Abfälle. Auch diese Mengenangaben berücksichtigen den gesetzlich geregelten Ausstieg aus der Kernenergienutzung und die Beendigung der Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen ab dem 01.07.2005.

Für die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes im Tonstein sind die Stückzahlen für Brennelemente und Kokillen geeignet, da diese zur Abschätzung der Endlagerkapazität unter Berücksichtigung eines entsprechenden Behälterkonzeptes benötigt werden. Die in Tabelle 2.2 und Tabelle 2.3 angegebenen Mengen- bzw. Massenangaben beziehen sich auf die zukünftig insgesamt endzulagernden Brennelemente bzw. auf die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland.

Tab. 2.2 Prognostizierte Stückzahlen für wärmeentwickelnde Abfälle /GRS 07a/

Abfallart / Abfallgebinde	Anzahl
CSD-V	3.612
CSD-C	5.436
CSD-B	616
Bestrahlte SWR BE	17.309
Bestrahlte DWR BE	13.061
THTR / AVR Behälter	ca. 370

Die mit der Anzahl der bestrahlten Brennelemente korrespondierende Masse an Schwermetall (SM) in den bestrahlten Brennelementen ist in Tab. 2.3 dargestellt.

Tab. 2.3 Masse an Schwermetall (SM) der zukünftig direkt endzulagernden bestrahlten Brennelemente /GRS 07a/

Bestrahlte Brennelemente	SM [Mg]
SWR	3.016
DWR	6.889

Für das Aufkommen an wärmeentwickelnden Abfällen kann auf unterschiedliche Quellen zurückgegriffen werden. Im Vorhaben ISIBEL /ISI 07/ wurden beispielsweise entsprechende Angaben aus der Projektgruppe "Nationaler Entsorgungsplan" /BMU 03/ bzw. Angaben der Gesellschaft für Nuklearservice (GNS) /GNS 06/ und des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) /FZK 05/ herangezogen. Die in /ISI 07/ dargestellten Zahlen wurden gegenüber den in Tabelle 2.1 für das VerSi-Vorhaben herangezogenen Zahlen überprüft. Die Abweichungen, die sich dabei gegenüber der Quelle /BMU 03/ ergeben sind z. T. erheblich, die gegenüber den Werten, die aus /GNS 06/ bzw. /FZK 05/ abgeleitet wurden eher marginal. Auch wenn sich die Ursachen für die Unterschiede der Prognosen bei einem Vergleich nicht unmittelbar im Detail erschließen lassen ist zu bedenken, dass die Prognosen auf bestimmten Ausgangszeitpunkten und den dort angenommenen Randbedingungen beruhen.

Für das Vorhaben VerSi wird die exakte Höhe des Bestandes an wärmeentwickelnden Abfällen in der Zukunft nicht ergebnisentscheidend sein. Entscheidend ist, dass für die Entwicklung einer Vergleichssystematik für einen Salz- und Tonsteinstandort gleiche und realistische Abfallmengen zu Grunde gelegt werden. Vor diesem Hintergrund werden die in Tabelle 2.2 genannten Abfallmengen, die auf aktuellen Arbeiten der GRS basieren, für das VerSi -Vorhaben zu Grunde gelegt.

Für die Auslegung der Referenz-Endlager in Steinsalz und Tonstein wird der bestrahlte Kernbrennstoff aus dem AVR bzw. THTR nicht weiter berücksichtigt. Die Berücksichtigung der vergleichsweise geringen Abfallmengen würde die Entwicklung der Endlagerkonzepte komplizierter – im Sinne von notwendigen Detailfestlegungen – machen, und sich letztlich nicht ergebnisorientiert auswirken.

2.4.3 Relevante Eigenschaften der radioaktiven Abfälle

2.4.3.1 Bestrahlte Brennelemente

Die direkte Endlagerung bestrahlter Brennelemente stellt bereits seit den 80er Jahren eine Entsorgungsoption dar. Nach der Einstellung der Transporte bestrahlter Brennelemente zur Wiederaufarbeitung ab Juli 2005 ist für die nach diesem Zeitpunkt angefallenen bestrahlten Brennelemente die direkte Endlagerung die einzige Entsorgungsmöglichkeit.

Aufgrund ihrer Zusammensetzung und Geometrie sind die nachfolgenden Brennelementtypen zu unterscheiden:

- DWR UO₂-Brennelemente
- DWR MOX-Brennelemente
- SWR UO₂-Brennelemente
- SWR MOX-Brennelemente

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des bestrahlten Kernbrennstoffs, insbesondere die für eine Endlagerung im Tonstein relevante Wärmeleistung (Nachzerfallswärme), wird darüber hinaus durch die Anfangsanreicherung des Kernbrennstoffs, den Abbrand im Reaktor sowie die Zeit der Abklinglagerung nach der Entnahme aus dem Reaktorkern bestimmt. Diese Parameter weisen im Hinblick auf die Menge der endzulagernden Brennelemente Schwankungen auf.

Für die Ableitung des Endlagerkonzeptes im Tonstein wurden folgende Vorgaben festgelegt:

- **Abbrand:** 55±5 GWd/tSM
- **Abklinglagerung:** 60 a für bestrahlte DWR MOX BE; 40 a für alle anderen bestrahlten BE
- **MOX-Anteil:** 10 %

Die Festlegungen wurden für Abbrandrechnungen mit dem OREST-Code /GRS 08/ weiter spezifiziert. Diese Rechnungen sind erforderlich, um für die einzelnen Brennelemente konkrete Wärmeleistungen in Abhängigkeit von der Abklingzeit zu bestimmen.

men. Die in den Rechnungen festgelegten Parameter ergeben sich im Detail aus der Tabelle 2.4.

Die Ergebnisse der Abbrandrechnungen /GRS 08/ sind in Tabelle 2.5 bzw. in Abbildung 2.1 dargestellt. Die angegebenen Wärmeleistungen beziehen sich jeweils auf eine Tonne Schwermetall des bestrahlten Kernbrennstoffs.

Tab. 2.4 Parameter für die OREST-Rechnungen zur Bestimmung der Nachzerfallswärmeleistung verschiedener Brennelemente /GRS 08/

Abbrandrechnungen Orest Code, Vers. 06			
DWR BE, Typ 16 x 16 – 20 UO₂		SWR BE, Typ 10 x 10 (Atrium) MOX	
UO₂	MOX	UO₂	MOX
55 GWd/tSM	60 GWd/tSM	50 GWd/tSM	60 GWd/tSM
4,4 % U-235	5,6 % Pu-fiss.	4,0 % U-235	5,6 % Pu-fiss.
	8,52 % Pu-tot.		8,52 % Pu-tot.
	2,03 % Pu 238		2,03 % Pu 238
	54,4 % Pu-239		54,4 % Pu-239
	25,6 % Pu-240		25,6 % Pu-240
	11,3 % PU-241		11,3 % PU-241
	6,68 % Pu-242		6,68 % Pu-242

Tab. 2.5 Wärmeleistung für bestrahlten Kernbrennstoff in Abhängigkeit von der Abklingzeit /GRS 08/

Wärmeleistung [W/tSM]				
Zeit nach Entladung	DWR UO₂	DWR MOX	SWR UO₂	SWR MOX
10	2.165	6.026	1.846	5.702
20	1.653	4.883	1.420	4.670
30	1.369	4.149	1.173	3.988
40	1.150	3.601	982	3.474
50	977	3.183	832	3.081
60	840	2.860	712	2.774
80	641	2.406	539	2.338
100	511	2.109	426	2.049
120	425	1.902	351	1.844
140	365	1.749	300	1.691

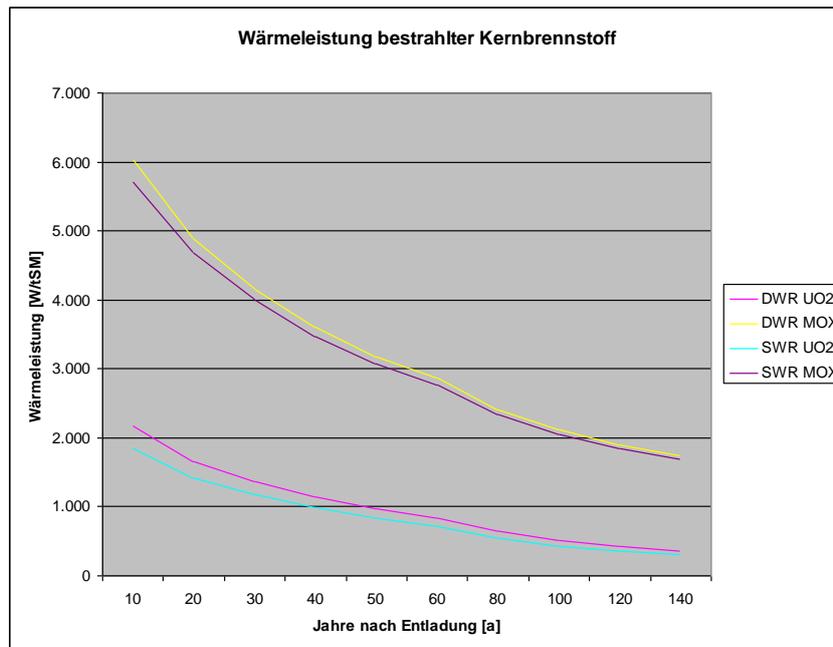


Abb. 2.1 Wärmeleistung von bestrahltem Kernbrennstoff (siehe auch Tab. 2.4) in Abhängigkeit von der Abklingzeit

Nimmt man für DWR-Brennelemente eine mittlere Schwermetallmenge von 0,52 tSM und für SWR-Brennelemente eine entsprechende Menge von 0,177 tSM an, ergeben sich die in Tabelle 2.6 und Abbildung 2.2 dargestellten Abhängigkeiten zwischen Wärmeleistung und Abklingzeit.

Tab. 2.6 Wärmeleistung für verschiedene bestrahlte Brennelemente (siehe auch Tab. 2.4) in Abhängigkeit von der Abklingzeit /GRS 08/

Wärmeleistung [W/Brennelement]				
Zeit nach Entladung	DWR UO₂	DWR MOX	SWR UO₂	SWR MOX
10	1.126	3.134	327	1.009
20	860	2.539	251	827
30	712	2.157	208	706
40	598	1.873	174	615
50	508	1.655	147	545
60	437	1.487	126	491
80	333	1.251	95	414
100	266	1.097	75	363
120	221	989	62	326
140	190	909	53	299

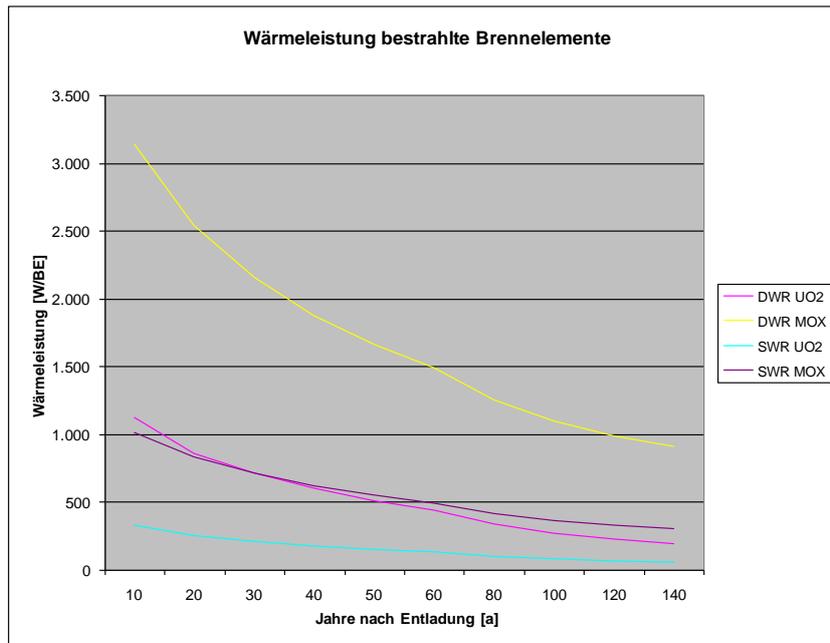


Abb. 2.2 Wärmeleistung verschiedener Brennelemente in Abhängigkeit von der Abklingzeit

In Tabelle 2.7 ist das nuklidspezifische Aktivitätsinventar in bestrahlten LWR-Brennelementen jeweils für UO₂- sowie MOX-Brennstoff zusammengestellt, so wie sich dieses unmittelbar aus den Abbrandrechnungen ergab. Die Parameter für die durchgeführten Abbrandrechnungen /GRS 08/ ergeben sich aus Tabelle 2.4. Zu berücksichtigen ist, dass für das Vorhaben VerSi auf verfügbare Abbrandrechnungen zurückgegriffen wurde. Dies erklärt beispielsweise, dass die Abbrandrechnungen für SWR mit Brennstoffverunreinigungen und DWR ohne Brennstoffverunreinigungen gerechnet wurden. Insofern wird beispielsweise Ci-36 als Aktivierungsprodukt aus der Brennstoffverunreinigung bei SWR-Brennelementen ausgewiesen, für DWR Brennelemente hingegen nicht.

Für DWR-Brennelemente wurde keine Aktivierung der Hüllrohr- und Strukturmaterialien berücksichtigt. Für SWR-Brennelemente wäre eine entsprechende Aktivierungsrechnung aufgrund des vorhandenen Instrumentariums für die Modellrechnungen nicht möglich gewesen. Die verwendeten Abbrandrechnungen sind insofern konsistent. Für das Radionuklid Se-79 wurde in den Rechnungen mit dem OREST-Code eine Halbwertszeit von 1,1 Mio. Jahren berücksichtigt.

Der sicherlich vereinfachte Ansatz zur Charakterisierung des Radionuklidinventars in den bestrahlten Brennelementen ist vor dem Hintergrund "Entwicklung einer Methodik

zum Vergleich von Sicherheitsanalysen“ für unterschiedliche Endlagerstandorte gerechtfertigt. Entscheidend ist, dass die vergleichenden Sicherheitsanalysen auf dem gleichen endgelagerten Nuklidinventar aufbauen. Die Frage, inwieweit das im Vorhaben VerSi abgeleitete Radionuklidinventar die Realität in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle widerspiegeln wird, stellt sich nicht.

Tab. 2.7 Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar für LWR-Brennelemente mit UO₂ sowie MOX-Brennstoff²

Radionuklidinventar in einem SWR UO ₂ BE							
(OREST-Abbrandrechnung 40 a nach Entladung /GRS 08/)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	1,067E+12	Ba-137m	3,830E+14	Po-218	2,726E+04	Pu-239	2,846E+13
Be-10	2,106E+06	Ce-144	2,246E+00	At-217	4,800E+03	Pu-239	2,037E+12
C-14	1,243E+10	Pr-144	2,246E+00	Rn-219	1,812E+05	Pu-240	4,007E+12
Cl-36	5,606E+08	PR-144m	3,145E-02	Rn-220	3,009E+08	Pu-241	1,461E+14
Fe-55	1,956E+07	Pm-146	1,606E+07	Rn-222	2,726E+04	Pu-242	2,407E+10
Co-60	3,147E+10	Pm-147	2,797E+10	Fr-221	4,800E+03	Am-241	2,882E+13
Ni-59	2,370E+08	Sm-146	3,726E+03	Fr-223	2,535E+03	Am-242m	6,099E+10
Ni-63	2,568E+10	Sm-147	4,751E+04	Ra-223	1,812E+05	Am-242	6,076E+10
Se-79	1,887E+08	Sm-151	1,691E+12	Ra-224	3,009E+08	Am-243	2,692E+11
Sr-90	2,646E+14	Eu-152	1,293E+09	Ra-225	4,800E+03	Cm-242	5,025E+10
Y-90	2,646E+14	Eu-154	2,285E+12	Ra-226	2,726E+04	Cm-243	9,623E+10
Zr-93	1,718E+10	Eu-155	1,240E+11	Ac-225	4,800E+03	Cm-244	9,420E+12
Nb-93m	1,459E+10	Ho-166m	5,158E+07	Ac-227	1,811E+05	Cm-245	4,398E+09
Nb-94	2,754E+06	Tl-207	1,807E+05	Th-227	1,788E+05	Cm-246	1,231E+09
Mo-93	1,779E+08	Ti-208	1,080E+08	Th-228	3,007E+08	Summe	1,550E+15
Tc-99	1,303E+11	Tl-209	1,008E+02	Th-229	4,800E+03		
Ru-106	5,646E+03	Ti-210	6,542E+00	Th-230	3,074E+06		
Rh-106	5,648E+03	Pb-209	4,800E+03	Th-231	7,404E+07		
Pd-107	1,163E+09	Pb-210	9,558E+03	Th-234	2,039E+09		
Ag-108	6,202E+06	Pb-211	1,812E+05	Pa-231	2,733E+05		
Ag-108m	7,128E+07	Pb-212	3,009E+08	Pa-233	3,407E+09		
Ag-109m	2,584E+00	Pb-214	2,726E+04	Pa-234m	2,039E+09		
Cd-109	2,584E+00	Bi-210	9,562E+03	Pa-234	2,651E+06		
Cd-113m	3,593E+08	Bi-211	1,812E+05	U-232	2,926E+08		
Sm-121	6,262E+10	Bi-212	3,009E+08	U-233	7,069E+05		
Sn-121m	8,069E+10	Bi-213	4,800E+03	U-234	9,395E+09		
Sb-125	2,533E+09	Bi-214	2,726E+04	U-235	7,402E+07		
Sb-126	7,354E+08	Po-210	9,562E+03	U-236	2,198E+09		
Sb-126m	5,253E+09	Po-211	5,439E+02	U-237	3,510E+09		
Te-125m	6,188E+08	Po-212	1,928E+08	U-238	2,039E+09		
I-129	2,620E+08	Po-213	4,699E+03	Np-237	3,407E+09		
Cs-134	2,678E+09	Po-214	2,726E+04	Np-238	2,745E+08		
Cs-135	4,990E+09	Po-215	1,812E+05	Np-239	2,692E+11		
Cs-137	4,057E+14	Po-216	3,009E+08	Pu-236	4,678E+05		

Radionuklidinventar in einem SWR MOX BE							
(OREST-Abbrandrechnung 40 a nach Entladung /GRS 08/)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	7,492E+11	PR-144m	2,788E-02	Rn-220	1,518E+08	Pu-241	9,363E+14
Be-10	2,561E+06	Pm-146	7,071E+07	Rn-222	4,037E+04	Pu-242	1,965E+11
C-14	2,717E+09	Pm-147	3,276E+10	Fr-221	2,697E+03	Am-241	2,032E+14
Co-60	3,117E-07	Sm-146	6,526E+03	Fr-223	1,072E+03	Am-242m	1,830E+12
Ni-63	8,431E+01	Sm-147	5,919E+04	Ra-223	7,671E+04	Am-242	1,823E+12
Se-79	1,883E+08	Sm-151	5,710E+12	Ra-224	1,518E+08	Am-243	2,474E+12
Sr-90	1,620E+14	Eu-152	1,825E+10	Ra-225	2,697E+03	Cm-242	1,508E+12
Y-90	1,620E+14	Eu-154	5,869E+12	Ra-226	4,037E+04	Cm-243	1,146E+12
Zr-93	1,445E+10	Eu-155	2,239E+11	Ac-225	2,697E+03	Cm-244	1,435E+14
Nb-93m	1,220E+10	Ho-166m	1,897E+07	Ac-227	7,659E+04	Cm-245	1,635E+11
Nb-94	4,354E+06	Ti-207	7,648E+04	Th-227	7,563E+04	Cm-246	2,882E+10
Tc-99	1,532E+11	Tl-208	5,450E+07	Th-228	1,517E+08	Summe	2,788E+15
Ru-106	8,993E+03	Ti-209	5,664E+01	Th-229	2,697E+03		
Rh-106	9,032E+03	Tl-210	9,693E+00	Th-230	5,981E+06		
Pd-107	2,981E+09	Pb-209	2,697E+03	Th-231	3,949E+07		
Ag-108	3,443E+04	Pb-210	1,152E+04	Th-234	1,928E+09		
Ag-108m	3,956E+05	Pb-211	7,671E+04	Pa-231	1,180E+05		
Ag-109m	3,034E-01	Pb-212	1,518E+08	Pa-233	2,975E+09		
Cd-109	3,034E-01	Pb-214	4,039E+04	Pa-234m	1,928E+09		
Cd-113m	1,995E+09	Bi-210	1,152E+04	Pa-234	2,505E+06		
Sn-121	1,106E+11	Bi-211	7,671E+04	U-232	1,476E+08		
Sn-121m	1,425E+11	Bi-212	1,518E+08	U-233	4,262E+05		
Sn-126	9,022E+09	Bi-213	2,697E+03	U-234	2,708E+10		
Sb-125	3,526E+09	Bi-214	4,039E+04	U-235	3,949E+07		
Sb-126	1,263E+09	Po-210	1,152E+04	U-236	3,574E+08		
Sb-126m	9,022E+09	Po-211	2,301E+02	U-237	2,250E+10		
Te-125m	8,613E+08	Po-212	9,730E+07	U-238	1,926E+09		
I-129	4,278E+08	Po-213	2,641E+03	Np-237	2,975E+09		
Cs-134	2,867E+09	Po-214	4,037E+04	Np-238	8,236E+09		
Cs-135	1,263E+10	Po-215	7,671E+04	Np-239	2,474E+12		
Cs-137	4,832E+14	Po-216	1,518E+08	Pu-236	2,361E+05		
Ba-137m	4,563E+14	At-217	4,039E+04	Pu-238	1,774E+14		
Ce-144	1,991E+00	At-217	2,697E+03	Pu-239	7,314E+12		
Pr-144	1,991E+00	Rn-219	7,671E+04	Pu-240	2,809E+13		

² Gegenüber den vorläufigen Versionen des Berichts wurden die Tabellenwerte im Dezember 2010 geändert.

Tab. 2.7 (Fortsetzung) Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar für LWR-Brennelemente mit UO₂ sowie MOX-Brennstoff³

Radionuklidinventar in einem DWR UO ₂ BE (OREST-Abbrandrechnung 40 a nach Entladung /GRS 08/)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	1,967E+12	PR-144m	1,464E-01	Rn-220	1,288E+09	Pu-241	5,444E+14
Be-10	6,796E+06	Pm-146	7,764E+07	Rn-222	7,810E+04	Pu-242	7,774E+10
C-14	8,902E+09	Pm-147	9,745E+10	Fr-221	1,535E+04	Am-241	1,057E+14
Co-60	3,576E-07	Sm-146	1,025E+04	Fr-223	7,956E+03	Am-242m	1,746E+11
Ni-63	1,736E+02	Sm-147	1,396E+05	Ra-223	5,689E+05	Am-242	1,739E+11
Se-79	6,063E+08	Sm-151	6,978E+12	Ra-224	1,288E+09	Am-243	9,729E+11
Sr-90	8,606E+14	Eu-152	4,025E+09	Ra-225	1,535E+04	Cm-242	1,438E+11
Y 90	8,611E+14	Eu-154	8,564E+12	Ra-226	7,810E+04	Cm-243	3,539E+11
Zr-93	5,486E+10	Eu-155	4,217E+11	Ac-225	1,535E+04	Cm-244	3,817E+13
Nb-93m	4,583E+10	Ho-166m	4,040E+07	Ac-227	5,684E+05	Cm-245	2,200E+10
Nb-94	1,123E+07	Ti-207	5,673E+05	Th-227	5,611E+05	Cm-246	5,335E+09
Tc-99	4,172E+11	Ti-208	4,624E+08	Th-228	1,288E+09	Summe	5,173E+15
Ru-106	2,451E+04	Ti-209	3,223E+02	Th-229	1,535E+04		
Rh-106	2,451E+04	Ti-210	1,875E+01	Th-230	9,162E+06		
Pd-107	3,828E+09	Pb-209	1,535E+04	Th-231	2,728E+08		
Ag-108	5,010E+04	Pb-210	2,770E+04	Th-234	5,933E+09		
Ag-108m	5,756E+05	Pb-211	5,689E+05	Pa-231	8,736E+05		
Ag-109m	2,766E-01	Pb-212	1,288E+09	Pa-233	1,253E+10		
Cd-109	2,766E-01	Pb-214	7,810E+04	Pa-234m	5,933E+09		
Cd-113m	1,380E+09	Bi-210	2,771E+04	Pa-234	7,712E+06		
Sn-121	2,065E+11	Bi-211	5,689E+05	U-232	1,253E+09		
Sn-121m	2,661E+11	Bi-212	1,288E+09	U-233	2,584E+06		
Sn-126	1,713E+10	Bi-213	1,535E+04	U-234	2,973E+10		
Sb-125	9,615E+09	Bi-214	7,810E+04	U-235	2,728E+08		
Sb-126	2,398E+09	Po-210	2,771E+04	U-236	7,062E+09		
Sb-126m	1,713E+10	Po-211	1,707E+03	U-237	1,309E+10		
Te-125m	2,348E+09	Po-212	8,258E+08	U-238	5,928E+09		
I-129	8,575E+08	Po-213	1,502E+04	Np-237	1,253E+10		
Cs-134	1,083E+10	Po-214	7,810E+04	Np-238	7,857E+08		
Cs-135	1,278E+10	Po-215	5,689E+05	Np-239	9,729E+11		
Cs-137	1,334E+15	Po-216	1,288E+09	Pu-236	2,239E+06		
Ba-137m	1,259E+15	Po-218	7,810E+04	Pu-238	1,052E+12		
Ce-144	1,046E+01	At-217	1,535E+04	Pu-239	7,410E+10		
Pr-144	1,046E+01	Rn-219	5,689E+05	Pu-240	1,294E+13		

Radionuklidinventar in einem DWR MOX BE (OREST-Abbrandrechnung 60 a nach Entladung /GRS 08/)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	7,207E+11	Pr-144	0,000E+00	Rn-219	2,486E+05	Pu-240	8,440E+13
Be-10	7,514E+06	PR-144m	0,000E+00	Rn-220	4,347E+08	Pu-241	1,178E+15
C-14	8,720E+09	Pm-146	2,733E+07	Rn-222	2,983E+05	Pu-242	5,392E+11
Co-60	6,230E-08	Pm-147	5,923E+08	Fr-221	8,934E+03	Am-241	6,791E+14
Ni-63	2,583E+02	Sm-146	1,422E+04	Fr-223	3,476E+03	Am-242m	3,994E+12
Se-79	5,528E+08	Sm-147	1,635E+05	Ra-223	2,486E+05	Am-242	3,978E+12
Sr-90	3,009E+14	Sm-151	1,832E+13	Ra-224	4,347E+08	Am-243	7,670E+12
Y 90	3,010E+14	Eu-152	1,632E+10	Ra-225	8,934E+03	Cm-242	3,290E+12
Zr-93	4,239E+10	Eu-154	3,870E+12	Ra-226	2,982E+05	Cm-243	2,577E+12
Nb-93m	3,942E+10	Eu-155	3,596E+10	Ac-225	8,934E+03	Cm-244	2,208E+14
Nb-94	1,629E+07	Ho-166m	5,268E+07	Ac-227	2,482E+05	Cm-245	5,949E+11
Mo-93	1,912E-09	Ti-207	2,479E+05	Th-227	2,451E+05	Cm-246	9,152E+10
Tc-99	4,540E+11	Ti-208	1,561E+08	Th-228	4,346E+08	Summe	5,051E+15
Ru-106	5,304E-02	Ti-209	1,876E+02	Th-229	8,934E+03		
Rh-106	5,304E-02	Ti-210	7,160E+01	Th-230	3,103E+07		
Pd-107	8,637E+09	Pb-209	8,934E+03	Th-231	1,210E+08		
Ag-108	8,772E+04	Pb-210	1,074E+05	Th-234	5,632E+09		
Ag-108m	1,008E+06	Pb-211	2,486E+05	Pa-231	3,437E+05		
Ag-109m	0,000E+00	Pb-212	4,347E+08	Pa-233	1,350E+10		
Cd-109	2,499E-05	Pb-214	2,983E+05	Pa-234m	5,632E+09		
Cd-113m	2,824E+09	Bi-210	1,075E+05	Pa-234	7,322E+06		
Sn-121	2,562E+11	Bi-211	2,486E+05	U-232	4,227E+08		
Sn-121m	3,301E+11	Bi-212	4,347E+08	U-233	2,285E+06		
Sn-126	2,640E+10	Bi-213	8,934E+03	U-234	9,688E+10		
Sb-125	8,559E+07	Bi-214	2,983E+05	U-235	1,210E+08		
Sb-126	3,696E+09	Po-210	1,075E+05	U-236	1,107E+09		
Sb-126m	2,641E+10	Po-211	7,457E+02	U-237	2,831E+10		
Te-125m	2,090E+07	Po-212	2,787E+08	U-238	5,632E+09		
I-129	1,258E+09	Po-213	8,746E+03	Np-237	1,350E+10		
Cs-134	1,297E+07	Po-214	2,982E+05	Np-238	1,798E+10		
Cs-135	3,124E+10	Po-215	2,486E+05	Np-239	7,670E+12		
Cs-137	9,209E+14	Po-216	4,347E+08	Pu-236	1,806E+04		
Ba-137m	8,694E+14	Po-218	2,983E+05	Pu-238	4,117E+14		
Ce-144	1,938E-07	At-217	8,934E+03	Pu-239	2,590E+13		

³ Gegenüber den vorläufigen Versionen des Berichts wurden die Tabellenwerte im Dezember 2010 geändert.

2.4.3.2 CSD-V

Abbildung 2.3 zeigt eine CSD-V, in die die verglasten Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente konditioniert werden /AND 05/.



Abb. 2.3 Schematische Darstellung und Foto einer CSD-V/AND 05/

Die Kokille besteht aus Edelstahl mit einer Masse (Tara) von etwa 95 kg. In die Kokille wird eine Glasmasse von ca. 450 kg abgefüllt. Bei einem Abbrand des Brennstoffs von 33 GWd/tSM beträgt die mittlere Dosisleistung einer HAW-Kokille in 1 m Abstand etwa:

- Gamma-Dosisleistung: ca. $2,0 \cdot 10^2$ Gy/h
- Neutronen Dosisleistung: ca. 0,8 mGy/h.

Das Gesamtaktivitätsinventar der Kokille beträgt etwa:

- Gesamt β/γ : $2,8 \cdot 10^{16}$ Bq
- Gesamt α : $1,4 \cdot 10^{14}$ Bq

Diese Angaben beziehen sich auf den Zeitpunkt der Kokillenherstellung bzw. einen Zeitraum von 4 Jahren nach der Entladung des Brennstoffs aus dem Reaktor.

Das nuklidspezifische Aktivitätsinventar einer CSD-V ist in Tabelle 2.8 zusammengestellt /BFS 03/.

Tab. 2.8 Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer CSD-V /BFS 03/

Radionuklidinventar einer CSD-V			
Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]
H-3	0,00E+00	Th-229	0,00E+00
C-14	7,29E+07	Th-230	2,99E+06
Cl-36	0,00E+00	Th-232	0,00E+00
Co-60	1,00E+12	Pa-231	1,00E+06
Ni-59	3,21E+09	U-233	0,00E+00
Ni-63	2,20E+11	U-234	7,91E+07
Se-79	1,90E+10	U-235	1,70E+06
Sr-90	3,40E+15	U-236	0,00E+00
Zr-93	1,50E+11	U-238	2,40E+07
Nb-93m	1,10E+07	Np-237	1,60E+10
Nb-94	6,31E+08	Pu-238	1,00E+12
Mo-93	1,10E+07	Pu-239	1,20E+11
Tc-99	7,10E+11	Pu-240	1,80E+11
Sn-126	2,91E+10	Pu-241	4,11E+13
I-129	4,19E+06	Pu-242	6,39E+08
Cs-135	7,61E+10	Am-241	4,70E+13
Cs-137	4,81E+15	Am-242m	3,59E+11
Sm-151	1,70E+13	Am-243	1,00E+12
Pb-210	0,00E+00	Cm-243	7,61E+11
Ra-226	0,00E+00	Cm-244	0,00E+00
Ac-227	1,00E+06	Cm-245	9,60E+13
Ra-228	0,00E+00	Gesamt	8,40E+15

Die Wärmeleistung einer HAW-Kokille in Abhängigkeit von der Entnahme des Brennstoffs aus dem Reaktor ist in Tabelle 2.9 dargestellt.

Tab 2.9 Wärmeleistung einer CSD-V in Abhängigkeit von der Entnahme des Brennstoffs aus dem Reaktor

Zeit [a]	6	8	10	13	33	73	104
Wärmel. [W]	1.745	1.500	1.260	1.120	670	275	151

2.4.3.3 CSD-C Kokillen

In CSD-C Kokillen werden kompaktierte Hülsen und Endkappen von SWR- und DWR-Brennelementen aus der Wiederaufarbeitung konditioniert. Der Durchmesser der

CSD-C beträgt $\varnothing = 440$ mm und die Höhe $h = 1.345$ mm. Damit unterscheidet sich die CSD-C hinsichtlich ihrer Abmaße nur geringfügig von einer CSD-V.

Die durchschnittliche γ -Dosisleistung an der Oberfläche beträgt ca. 50 Gy/h. Die Wärmeleistung der CSD-C Kokille liegt bei 20 Watt. Das nuklidspezifische Aktivitätsinventar einer CSD-C kann wie in Tabelle 2.10 spezifiziert werden /COL 09/. Bei den Aktivitätsinventaren handelt es sich um Maximalwerte.

Tab. 2.10 Maximales nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer CSD-C /COL 09/

Radionuklidinventar einer CSD-C							
Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]
H-3	1,50E+13	Cs-137	2,80E+13	Ra-223	7,10E+03	Am-242	3,50E+09
Be-10	6,90E+04	Ba-137m	2,60E+13	Ra-224	4,70E+06	Cm-242	2,90E+09
C-14	4,30E+10	Pm-147	2,10E+09	Ra-225	9,20E+01	Am-242m	3,50E+09
Cl-36	1,30E+08	Sm-147	8,40E+02	Ac-225	9,20E+01	Cm-245	2,80E+07
Mn-54	8,40E+00	Sm-151	6,60E+11	Ra-226	3,50E+03	Cm-246	5,40E+06
Fe-55	9,20E+10	Eu-152	2,20E+08	Ac-227	7,20E+03	Cm-243	1,90E+09
Co-60	7,40E+12	Eu-154	1,20E+11	Th-227	7,10E+03	Cm-244	4,80E+11
Ni-59	1,00E+12	Eu-155	5,10E+09	Th-228	4,70E+06	Summe α	2,80E+14
Ni-63	1,40E+14	Ho-166m	1,10E+06	Th-229	9,20E+01	Summe β/γ	6,10E+12
Se-79	1,30E+07	Tl-207	7,10E+03	Th-230	4,50E+05	Total	2,90E+14
Kr-85	7,20E+11	Tl-208	1,70E+06	Th-231	2,20E+07		
Sr-90	2,40E+13	Pb-209	9,20E+01	Pa-231	1,70E+04		
Y-90	2,40E+13	Pb-210	1,00E+03	Th-234	3,10E+08		
Zr-93	4,30E+10	Bi-210	1,00E+03	Pa-234	1,00E+06		
Nb-93m	3,70E+10	Pb-211	7,10E+03	Pa-234m	3,10E+08		
Nb-94	1,80E+11	Bi-211	7,10E+03	U-232	4,50E+06		
Mo-93	4,10E+09	Pb-212	4,70E+06	Pa-233	1,50E+08		
Tc-99	1,80E+10	Bi-212	4,70E+06	U-233	3,90E+04		
Ru-106	4,30E+03	Pb-214	3,50E+03	U-234	1,40E+09		
Rh-106	4,30E+03	Bi-214	3,50E+03	U-235	2,20E+07		
Pd-107	2,70E+08	Po-210	9,90E+02	U-235m	3,10E+11		
Ag-108	7,10E+05	Po-212	3,00E+06	U-236	2,80E+08		
Ag-108m	8,20E+06	Bi-213	9,20E+01	U-237	3,10E+08		
Sn-119m	7,60E+00	Po-213	9,00E+01	Np-237	1,50E+08		
Sn-121	4,00E+10	Po-214	3,50E+03	U-238	3,10E+08		
Sn-121m	5,10E+10	Po-215	7,10E+03	Np-238	1,70E+07		
Sn-126	9,10E+07	Po-216	4,70E+06	Pu-238	1,90E+12		
Sb-126m	9,10E+07	Po-218	3,50E+03	Np-239	8,50E+09		
Sb-125	2,40E+10	At-217	9,20E+01	Pu-239	3,10E+11		
Te-125m	5,90E+09	Rn-219	7,10E+03	Pu-240	4,20E+11		
Sb-126	1,30E+07	Rn-220	4,70E+06	Pu-241	1,30E+13		
I-129	4,30E+08	Rn-222	3,50E+03	Am-241	2,90E+12		
Cs-134	2,50E+08	Fr-221	9,20E+01	Pu-242	1,60E+09		
Cs-135	1,30E+09	Fr-223	9,90E+01	Am-243	8,50E+09		

2.4.3.4 CSD-B Kokillen

In CSD-B Kokillen werden Reststoffe aus der Betriebswasseraufbereitung der Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen in einer Glasfritte konditioniert. Die CSD-B ist in ihren äußeren Abmessungen identisch mit der CSD-V ($\varnothing = 430$ mm, Höhe $h = 1.335$ mm).

Die Wärmeleistung der CSD-B Kokille wird in /DBE 08/ im Bereich zwischen 0,07 und 0,005 kW angegeben. Für das VerSi-Vorhaben wird eine mittlere Wärmeleistung von 20 W unterstellt. Das nuklidspezifische Aktivitätsinventar einer CSD-B kann aus /COG 91/ und /BFS 09/ wie in Tabelle 2.11 spezifiziert werden.

Tab. 2.11 Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer CSD-B /BFS 03/

Radionuklidinventar einer CSD-B			
Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]
<i>H-3</i>	4,94E+10	<i>Eu-154</i>	1,48E+11
<i>Co-60</i>	4,94E+09	<i>Eu-155</i>	4,94E+10
<i>Sr-90</i>	4,94E+11	<i>U-235</i>	2,57E+03
<i>Y-90</i>	4,94E+11	<i>U-238</i>	2,57E+03
<i>Tc-99</i>	4,94E+08	<i>Pu-238</i>	5,77E+10
<i>Ru-106</i>	6,18E+12	<i>Pu-239</i>	6,16E+09
<i>Rh-106</i>	6,18E+12	<i>Pu-240</i>	7,70E+09
<i>Sb-125</i>	2,47E+11	<i>Pu-241</i>	3,85E+12
<i>I-129</i>	4,94E+08	<i>Am-241</i>	2,57E+09
<i>Cs-134</i>	2,47E+11	<i>Cm-242</i>	8,98E+08
<i>Cs-137</i>	4,94E+11	<i>Cm-243</i>	4,49E+08
<i>Ba-137m</i>	4,94E+11	<i>Cm-244</i>	7,63E+09
<i>Ce-144</i>	9,88E+10	<i>others β/γ</i>	4,94E+10
<i>Pr-144</i>	9,88E+10	<i>others α</i>	2,57E+08
<i>Pm-127</i>	1,48E+11		

2.5 Behälterkonzept

2.5.1 Bestehende Konzepte

Die Endlagerbehälter für die endzulagernden wärmeentwickelnden Abfälle müssen mit dem entsprechenden Endlager- und Sicherheitskonzept korrespondieren. Das Behälterkonzept ist ein integraler Bestandteil des Endlagerkonzeptes.

Das Ende der 80er Jahre für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle entwickelte Polluxbehälterkonzept (Referenzkonzept) wurde vor dem Hintergrund des laufenden Planfeststellungsverfahrens für den Endlagerstandort Gorleben entwickelt. Das Polluxkonzept hat als Referenzkonzept noch Bestand, allerdings wurden auch für die Endlagerung von bestrahlten Brennelementen in Steinsalz alternative Ansätze für Endlagerbehälter, z.B. Brennelementbüchsen, entwickelt /DBE 95/. Diese Behälterentwicklung bezieht sich auf eine mögliche Bohrlochlagerung der bestrahlten Brennelemente.

Ob sich das Polluxbehältersystem für eine Endlagerung im Tongestein eignet, wurde bisher nicht untersucht. Eine Randbedingung, dass z.B. bereits eine erhebliche Anzahl von Pollux-Endlagerbehältern existieren würde, besteht nicht. Für die Ableitung eines generischen Behälterkonzeptes für einen Tonsteinstandort bestehen insofern keine nachhaltigen Vorfestlegungen.

2.5.2 Behälterkonzept für die Endlagerung im Tonstein

Das in der Schweiz im Rahmen des Entsorgungsnachweises entwickelte Endlagerkonzept weist mit Blick auf die deutschen Randbedingungen entscheidende Parallelen auf. Die wesentlichste Parallele ist, dass auch das Endlagerkonzept der Schweiz die direkte Endlagerung von bestrahlten Brennelementen vorsieht. In Frankreich stellt bestrahlter Kernbrennstoff kein radioaktiver Abfall dar und die französische Machbarkeitsstudie für ein HAW-Endlager /AND 05/ weist nur optional eine gewisse Kapazität für bestrahlte Brennelemente aus. Ferner berücksichtigt das französische Endlagerkonzept die Reversibilität der Endlagerung sowie konstruktive Maßnahmen zur Beherrschung der Gasbildung, die von den dort im erheblichen Umfang vorliegenden bituminierten radioaktiven Abfällen ausgeht. Diese Abfallform, wie auch die Reversibilität der Einlagerungsvorgänge, hat für das deutsche Endlagerkonzept keine Bedeutung. Das generische Endlagerkonzept für einen Standort im Tonstein wird sich daher vorrangig an dem Endlager- und Behälterkonzept der Schweiz orientieren.

In der Schweiz /NAG 02a/ ist vorgesehen, die hochradioaktiven Abfälle (bestrahlte Brennelemente, HAW-Kokille) in den in Abb. 2.4 dargestellten Behältern endzulagern.

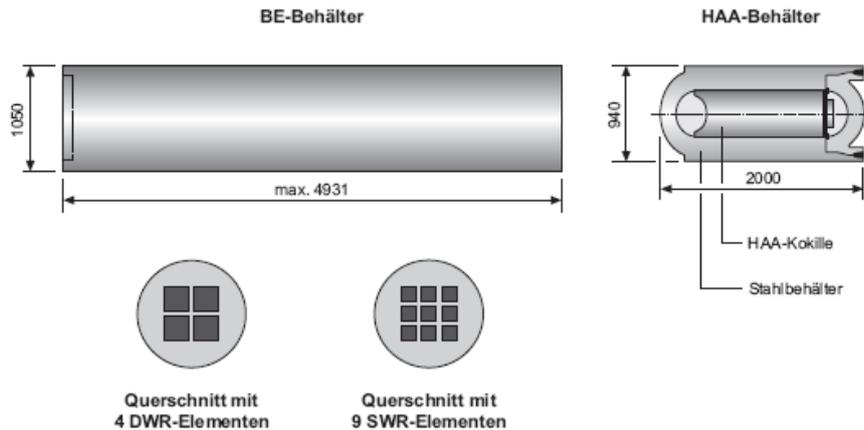


Abb. 2.4 Endlagerbehälter für bestrahlte Brennelemente und HAW-Kokillen entsprechend /NAG 02a/.

Bestrahlte Brennelemente werden in Behältern mit folgenden Spezifikationen endgelagert /NAG 02b/:

- Wandstärke: ca. 150 mm
- Masse: ca. 26 Mg
- Restvolumen: ca. 0,7 m³
- Auslegungszeit: Minimum 1.000 a; erwartet 10.000 a

Die verglasten Abfälle werden in Behältern mit folgenden Spezifikationen endgelagert /NAG 02b/:

- Wandstärke: 250 mm
- Masse: 8,4 Mg
- Auslegungszeit: Minimum 1.000 a; erwartet 10.000 a

Das generische Endlagerkonzept im Tonstein orientiert sich weitestgehend am Endlagerkonzept der Schweiz /NAG 02a/. Eine entscheidende Randbedingung für die Auslegung des schweizerischen Endlagerkonzeptes ist, dass der Tonstein nicht auf Temperaturen > 100°C aufgeheizt wird /NAG 03/. Diese Randbedingung führte in der Schweiz zu der Anforderung, dass die Wärmeleistung eines Abfallgebundes auf < 1.500 W begrenzt wurde. Diese Randbedingung wird konsequent auch für das generische Endlagerkonzept im Tonstein berücksichtigt. Da für das deutsche Endlagerkonzept bei den bestrahlten Brennelementen eine Abkling- bzw. Zwischenlagerzeit von 40 Jahren vor Beginn der Endlagerung festgelegt ist, kann die Wärmeleistung der entsprechenden Abfallgebunde nur noch über die Beladung der Endlagerbehälter gesteuert werden.

Die Wärmeleistung der zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente ist in Tabelle 2.6 dargestellt. Die Wärmeleistung der bestrahlten Brennelemente und die Begrenzung der Wärmeleistung auf 1.500 W pro Abfallgebinde führen zu der nachfolgend genannten Beladung der Endlagerbehälter mit bestrahlten Brennelementen:

- **Ein** DWR MOX-Brennelement / Abfallbehälter
- **Zwei** DWR UO₂-Brennelemente / Abfallbehälter
- **Zwei** SWR MOX-Brennelemente / Abfallbehälter
- **Acht** SWR UO₂-Brennelemente / Abfallbehälter

Das entsprechende Behältersystem ist in Abbildung 2.5 grafisch dargestellt.

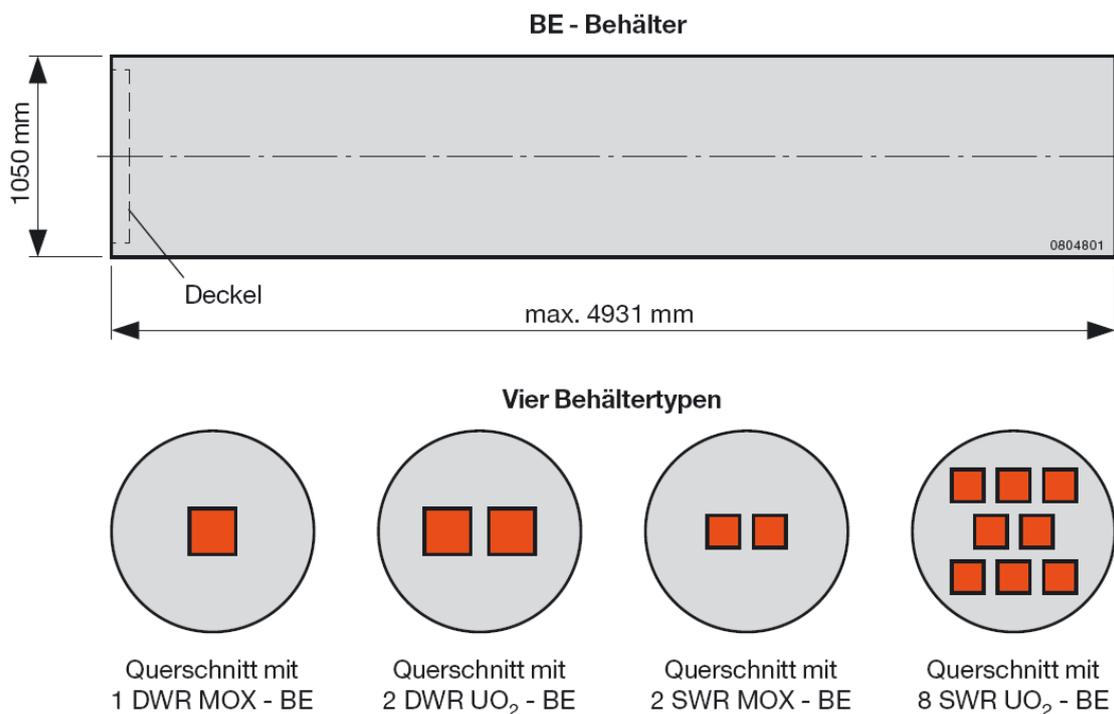


Abb. 2.5 Endlagerbehälter (Stahl) für bestrahlte Brennelemente

In Tabelle 2.12 sind die Behälterzahlen dargestellt, die sich aus dem Behälterkonzept und dem Aufkommen der bestrahlten Brennelemente, siehe auch Tabelle 2.2, ergeben werden. Zu beachten ist, dass für bestrahlte DWR MOX-Brennelemente der Grenzwert für die Wärmeleistung von 1.500 W mit einer Abklingzeit von 40 Jahren nicht erreichbar ist. Für diese Brennelemente wird der Grenzwert 1.500 W erst nach etwa 60 Jahren Abklingzeit erreicht. Das bedeutet, dass diese Abfallgebinde erst zu einem späteren

Zeitpunkt, etwa in der zweiten Hälfte der Betriebsphase des Endlagers, angeliefert und eingelagert werden können. In Tabelle 2.12 ist darüber hinaus auch die Anzahl der endzulagernden HAW-Kokillen dargestellt. Für das generische Endlagerkonzept wird für die Endlagerung der HAW-Kokillen der in Abbildung 2.4 dargestellte Endlagerbehälter (rechte Bildseite) übernommen.

Das Aktivitätsinventar der Endlagerbehälter für bestrahlte Brennelemente kann dem Anhang A1 bis A4 entnommen werden. Das entsprechende Inventar eines Endlagerbehälters mit einer CSD-V ist dem Anhang A5 zu entnehmen, es entspricht im Übrigen den Angaben in Tabelle 2.10, da der Endlagerbehälter mit nur einer CSD-V beladen wird.

Tab. 2.12 Anzahl der endzulagernden Abfallgebinde mit wärmeentwickelndem Abfall

Behälter					
<i>(Wärmeleist.: max. 1.5 kW, 40 a nach Entladung bzw. für DWR MOX 60 a)</i>					
	DWR UO₂	DWR MOX	SWR UO₂	SWR MOX	HAW Kokille
BE / Behälter	2	1	8	2	1
W / Behälter	1.196	ca. 1.500	1.391	1.230	ca. 600
Anzahl Behälter	5.877	1.306	1.947	865	3.612
Summe Behälter	13.607				

Für das generische Endlagerkonzept wird unterstellt, dass die Kokillen mit mittlerradioaktivem Abfall entsprechend dem schweizerischen Endlagerkonzept in Betonbehältern endgelagert werden. Dieser Betonbehälter, siehe auch Abb. 2.6, kann neun Kokillen aufnehmen. Die Kokillen werden in den Behälter eingestellt, die verbleibenden Hohlräume werden mit Zementmörtel verfüllt.

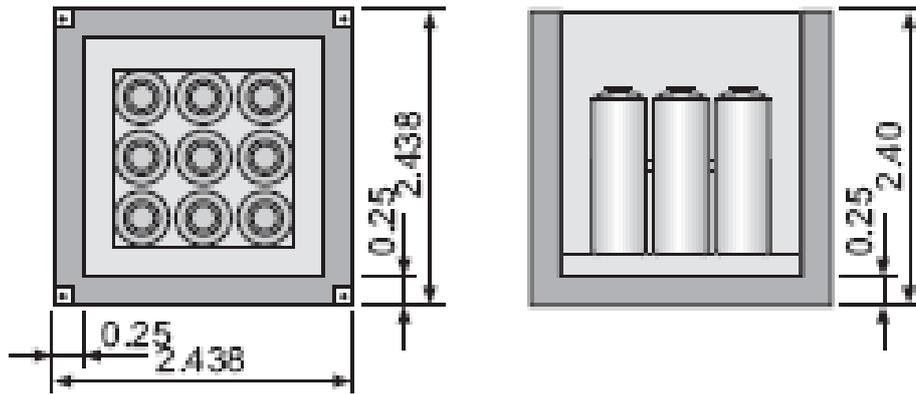


Abb. 2.6 Endlagerbehälter für CSD-B bzw. CSD-C entsprechend /NAG 2a/

Legt man den in Abb. 2.6 skizzierten Behälter zugrunde, wären von diesem Behälter unter Berücksichtigung der Angaben in Tab. 2.2 in Deutschland ca. 673 Abfallgebinde endzulagern. Das nuklidspezifische Aktivitätsinventar eines solchen Endlagerbehälters beladen mit CSD-C ist im Anhang A6 und beladen mit CSD-B im Anhang A7 dargestellt.

2.5.3 Abfall-Mengengerüste

Die Ableitung eines Endlagerkonzeptes im Tonstein, basierend auf vergleichbaren Endlagerkonzepten im Ausland, legt einen Vergleich der jeweiligen Abfall-Mengengerüste nahe. Eine Gegenüberstellung des deutschen Abfall-Mengengerüsts, basierend auf den Werten aus /GRS 07a/ und den entsprechenden Werten aus der Schweiz /NAG 02a/ ist in der Tabelle 2.13 dargestellt.

Aus der Gegenüberstellung der Mengengerüste wird deutlich, dass für ein deutsches Endlagerkonzept im Vergleich zu dem bestehenden Konzept in der Schweiz eine vier- bis fünffache Lagerkapazität vorzusehen ist. Das 1-söhlige Endlagerkonzept der Schweiz führt zu einem Flächenbedarf des Endlagerbergwerks von etwa 2 km² /NAG 02a/. Entsprechend der für Deutschland notwendigen Endlagerkapazität wird der Flächenbedarf mit etwa 8 bis 10 km² abgeschätzt werden.

Tab. 2.13 Vergleich endzulagernder wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland und der Schweiz

Abfallgebinde	Deutschland	Schweiz		
		Ref.-szenarium	Variante 1	Variante 2
Be-Behälter	ca. 10.000	ca. 2.100	ca. 2.100	ca. 3.600
HAW-Behälter	ca. 3.600	ca. 750	ca. 750	ca. 750
MAW-Behälter	ca. 670	ca. 270	ca. 500	ca. 600

2.5.4 Korrosion der Abfallbehälter

Mit den Abfallbehältern werden erhebliche Mengen an korrosionsfähigem Stahl in das Endlager eingebracht. Die NAGRA geht von einem langzeitigen Mittelwert für die Korrosionsrate von 1 µm pro Jahr aus. Bis zum Aufbau der schützenden Korrosionsschicht kann dieser Wert deutlich höher sein. Ausgehend von der mittleren Korrosionsrate hat die NAGRA eine durch Korrosion festgelegte Gasproduktion von 0,1 Normkubikmeter Gas pro Jahr und Abfallgebinde ermittelt /KSA 05/. Die NAGRA geht davon aus, dass sich nach ca. 20.000 Jahren ein quasistationärer Druckzustand einstellt und dass sich die durch den Druck entstehenden Mikrorisse im Tongestein bei nachlassendem Porenwasserdruck von selbst schließen werden (Selbstheilung). Die KSA /KSA 05/ teilt diese Einschätzung nicht vollständig. Sie hält es für erforderlich, dass der Sachverhalt der "Selbstheilung" weiter untersucht wird und schlägt darüber hinaus vor, andere Behälterwerkstoffe in die Untersuchungen einzubeziehen. Als wesentliche Alternative werden Stahlbehälter mit einer Kupferplattierung angesehen. Auf die umfangreichen Untersuchungen zu dieser Werkstoffkombination in Schweden und Finnland wird hingewiesen /KSA 05/.

3 Endlagerplanung

3.1 Untertägige Anlage

Es wird ein einsöhliges Endlagerkonzept in einer Teufe von ca. 450 m geplant, in dem Einlagerungsbereiche für HAW (bestrahlte Brennelemente / verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) und MAW (technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) getrennt eingelagert werden. In Abb. 3.1 ist das Endlagerkonzept in seiner Aufsicht skizziert.

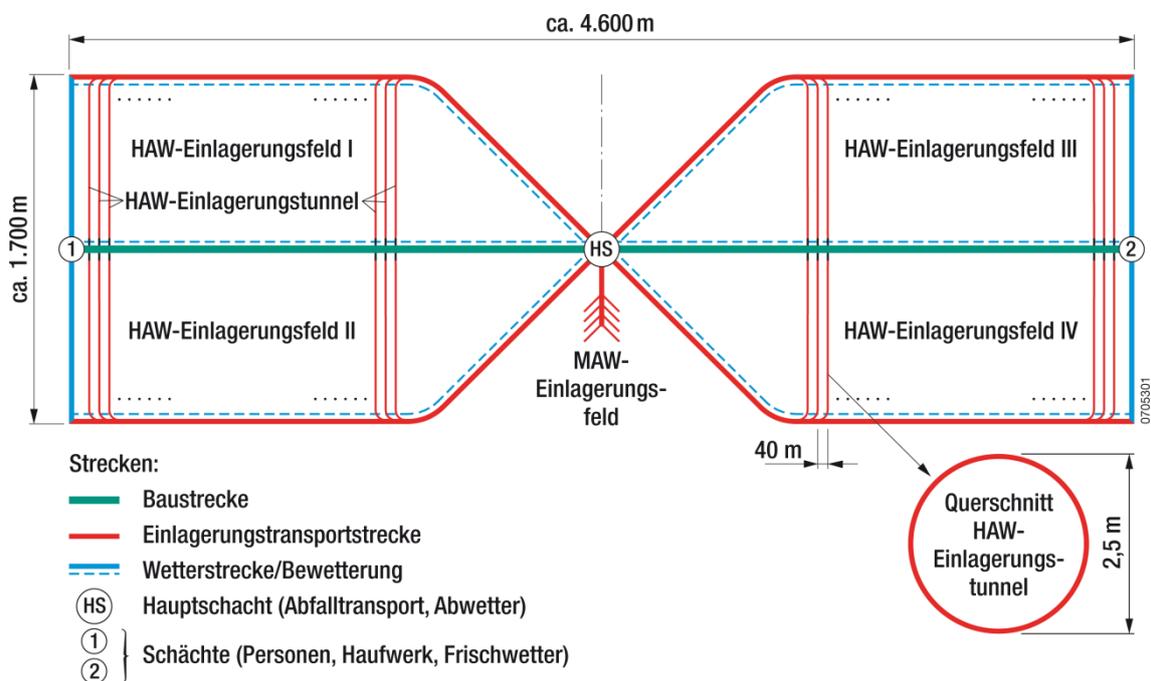


Abb. 3.1 Skizze des Endlagerkonzeptes

Die HAW-Abfallgebinde mit den bestrahlten Brennelementen bzw. mit den verglasten Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung werden in die Einlagerungstunnel der Einlagerungsfelder I bis IV eingelagert. Die Einlagerungsfelder werden für die einzulagernden radioaktiven Abfälle über Einlagerungstranstrecken erschlossen, die im Uhrzeigersinn im Winkel von ca. 45°, 135°, 225° und 315° vom Hauptschacht (HS) abgehen. Nach ca. 1.200 m werden die Einlagerungstranstrecken parallel zur sogenannten Baustrecke verschwenkt. Im Bereich der Einlagerungsfelder beträgt der parallele Abstand zwischen der Bau- und der Einlagerungstranstrecke ca. 830 m.

Die Gesamtlänge der Einlagerungstunnel, die zwischen der Bau- und Einlagerungstransportstrecke liegt, beträgt ca. 800 m.

Die Abfallgebinde mit dem wärmeentwickelnden Abfall werden in den Einlagerungstunneln mit einem axialen Abstand von 3 m abgelegt (Streckenlagerung). Da die Einlagerungstunnel beidseitig mit einem Abdichtbauwerk verschlossen werden, reduziert sich die effektive Länge für die Einlagerung der Abfallgebinde auf etwa 750 m. Unter diesen Randbedingungen und der Anzahl der endzulagernden Abfallgebinde kann die notwendige Anzahl der Einlagerungstunnel pro Einlagerungsfeld bestimmt werden. Die Tabelle 3.1 enthält hierzu die entsprechenden Angaben.

Die notwendige Anzahl der Einlagerungstunnel pro Einlagerungsfeld liegt bei ca. 33. Bei einem radialen Abstand der Einlagerungstunnel (// Achse zu Achse) von 42,5 m und einem Tunneldurchmesser von 2,5 m, beträgt die Länge eines Einlagerungsfeldes ca. 1.500 m, wobei der Abstand zwischen dem letzten Einlagerungstunnel und der parallel verlaufenden Wetterstrecke mit 80 m angenommen wird. Die Länge einer Bau-strecke, die zwischen dem Hauptschacht mit dem Schacht 1 bzw. 2 verläuft, siehe Abb. 3.1, beträgt etwa 2.300 m. Die Ausdehnung des Endlagers in West-Ost-Richtung wird weniger als 5,0 km betragen. Die Ausdehnung des Endlagers in Nord-Süd-Richtung wird weniger als 2 km betragen. Hieraus errechnet sich ein Flächenbedarf von < 10 km² für das gesamte Endlager. Eine erste Abschätzung aus den endzulagernden Abfallmengen hatte einen Flächenbedarf 8 bis 10 km² erwarten lassen, siehe Kapitel 2. Der für das Endlagerkonzept abgeschätzte Flächenbedarf deckt sich auch mit dem vom AkEnd /AKE 02/ genannten Flächenbedarf für ein Endlagerlager in einer Tonsteinformation. Der AkEnd hat hierzu einen Wert von etwa 10 km² auf der Grundlage eines allgemeinen wissenschaftlichen Ansatzes abgeleitet.

Aus konzeptioneller bzw. betrieblicher Sicht besteht keine Notwendigkeit, dass die Abfallgebinde mit den HAW-Glaskokillen und den bestrahlten Brennelementen in separaten Einlagerungstunneln endgelagert werden. Umgekehrt ist aber auch keine gezielte Mischung dieser Abfallgebinde, z.B. zur Begrenzung des Wärmeeintrags, notwendig. Die Anlieferung der unterschiedlichen Abfallgebinde wird durch die Betriebsorganisation bestimmt und kampagnenorientiert erfolgen.

Tab. 3.1 Ermittlung der notwendigen Einlagerungstunnel für HAW-Abfallgebäude

Behälter und HAW-Einlagerungstunnel (Wärmeleistung : max. 1,5 kW, 40 a nach Entladung bzw. DWR MOX 60 a)					
	DWR UO₂	DWR MOX	SWR UO₂	SWR MOX	CSD-V
BE / Behälter	2	1	8	2	1
Wärmeleist / Behälter [W]	1.196	ca. 1.500	1.391	1.230	ca. 600
Anzahl der Behälter	5.877	1.306	1.947	865	3.612
Summe Behälter	9.995				3.612
Notwendige EL-tunnel (eff. 750 m / Tunnel)	107				24
Anzahl der notwendige EL-tunnel gesamt	131				
Anzahl der EL-tunnel / EL-feld	33				

Die Auffahrung bzw. der Ausbau des Grubengebäudes erfolgt in zwei Ausbaustufen. In der ersten Ausbaustufe wird der Hauptschacht (HS), der Schacht (1), die Einlagerungstransportstrecken für die Einlagerungsfelder I und II, die entsprechende Baustrecke, die notwendigen Wetterstrecken sowie der MAW Einlagerungsbereich aufgeföhren. Über den Hauptschacht werden insbesondere die Abfallgebäude in das Endlagerbergwerk transportiert.

Im Zuge der vollständigen Befüllung der Einlagerungsfelder I und II beginnt die 2. Ausbaustufe mit der Auffahrung der Einlagerungsfelder III und IV und der für den Einlagerungsbetrieb notwendigen Infrastrukturstrecken. In der 2. Ausbaustufe erfolgt auch das Abteufen des Schachtes 2. Das Grubengebäude wird in seiner letzten Ausbaustufe durch drei Schächte erschlossen sein.

Das Endlagerbergwerk muss aus betrieblicher Sicht über einen Service- und Infrastrukturbereich verfügen, der Bestandteil des untertägigen Kontrollbereichs ist. Diese Bereiche umfassen u.a. die Wasserhaltung, Energieversorgung, Treibstofflager und Werkstatt. Aus Gründen der kerntechnischen Sicherheit sollten diese Bereiche von den Einlagerungsbereichen und den Einlagerungstransportstrecken für die radioaktiven Abfälle räumlich getrennt sein. Für das in Abb. 3.1 dargestellte generische Endlagerkonzept könnten diese Bereiche gegenüber dem MAW Einlagerungsbereich zwischen den HAW-Einlagerungsfeldern I und IV angeordnet werden.

3.1.1 HAW-Einlagerungsbereich

Das Endlagerkonzept sieht einen Einlagerungsbereich für HAW mit insgesamt vier Einlagerungsfeldern für Endlagerbehälter mit CSD-V sowie Endlagerbehältern mit bestrahlten Brennelementen vor, siehe Abb. 3.1. Die vier Einlagerungsfelder sind von ihrem Aufbau identisch und gruppieren sich symmetrisch um den Hauptschacht. Die vier HAW Einlagerungsfelder werden in der Reihenfolge I – II – III – IV aufgefahren. Diese Reihenfolge gewährleistet, dass die bestehende Baustrecke für den Übergang von den Einlagerungsfeldern I auf II bzw. III auf IV genutzt werden kann.

Das Endlagerbergwerk wird in der ersten Ausbaustufe (Nutzung der HAW-Einlagerungsfelder I und II) über zwei Schächte erschlossen. Es handelt sich um den zentralen Hauptschacht (HS) über den alle radioaktiven Abfälle in das Endlager transportiert werden und der als ausziehender Wetterschacht dient sowie den Schacht 1, für den Personen- und Materialtransport bzw. die einziehenden Frischwetter.

Der HAW-Einlagerungsbereich wird durch eine vollständige Umfahrung erschlossen. Diese Umfahrung umfasst folgende Hauptstrecken:

- Einlagerungstransportstrecke, in Abb. 3.1 rot dargestellt,
- Wetterstrecke, in Abb. 3.1 blau dargestellt,
- Baustrecke, in Abb. 3.1 grün dargestellt.

Diese Umfahrung bindet, wie in Abb. 3.1 dargestellt, den Hauptschacht sowie den Schacht 1 ein. Ein entsprechender Ausbau der Hauptstrecken trägt der Offenhaltung der Strecken bis zum Ende der Betriebsphase des Endlagers (ca. 50 Jahre) und den über diesen Zeitraum zu erwartenden geomechanischen Belastungen Rechnung.

Für die Endlagerung der HAW-Abfallgebinde werden zwischen der Baustrecke und der Einlagerungstransportstrecke parallele Einlagerungstunnel gebohrt. Diese Tunnel, die von der Baustrecke aus gestoßen werden, schließen mit einem entsprechenden Radius an die Einlagerungstransportstrecke an. Durch diesen Radius wird die Zugänglichkeit der Einlagerungstunnel für die Abfallgebinde von der Einlagerungstransportstrecke aus gewährleistet. Die Länge der Einlagerungstunnel beträgt etwa 800 m bei einem Tunneldurchmesser von 2,5 m. Sobald ein Einlagerungstunnel von der Baustrecke zur Einlagerungstransportstrecke durchschlägig erstellt ist, werden die Einlagerungstunnel

zur Baustrecke durch ein Abdichtbauwerk versiegelt. Der Einlagerungstunnel ist danach eine Blindstrecke, die nur noch von der Einlagerungs-transportstrecke zugänglich ist. Dieser Zugang wird als Schleuse ausgebildet.

Der Abstand zwischen zwei Einlagerungstunnel beträgt 40 m. Ein HAW-Einlagerungsfeld umfasst etwa 33 parallele Einlagerungstunnel. Die Abfallgebinde werden in den Einlagerungstunneln kraft- und formschlüssig auf Bentonitblöcken abgelegt, siehe auch Abb. 4.2.

Ein Ausbau der Einlagerungstunnel, der dauerhaft geomechanische Belastungen aufnehmen kann, ist vor dem Hintergrund des Nachweises der Langzeitsicherheit des Endlagers nicht vorgesehen. Als Sicherungsmaßnahmen werden ausschließlich Anker und Netze eingesetzt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass die Zeit der Offenhaltung von Einlagerungstunneln begrenzt werden muss. Dieser Zeitraum wird mit maximal zwei Jahren veranschlagt. Die Erstellung der Einlagerungstunnel muss insofern bedarfsorientiert erfolgen. D.h., dass neben einem Einlagerungstunnel in dem bereits eingelagert wird, maximal ein zweiter Einlagerungstunnel aufgeföhren wird. Der Bohrbetrieb zur Aufföhren der Einlagerungstunnel erfolgt nur in einlagerungsfreien Zeiten.

Die Aufföhren und die Einlagerung in das zweite HAW-Einlagerungsfeld (II) erfolgt analog zum ersten HAW-Einlagerungsfeld (I). Die bereits bestehende Baustrecke wird weiter genutzt.

Erst mit der zweiten Ausbaustufe des Endlagers bzw. mit der Aufföhren des dritten HAW-Einlagerungsfeldes (III) wird das Abteufen des Schachtes 2, siehe Abb. 3.2, erforderlich. Analog zum Schacht 1 dient auch dieser Schacht für den Personen- und Materialtransport sowie als einziehender Wetterschacht. Die zu erstellende Baustrecke zwischen dem Hauptschacht und dem Schacht 2 dient zur Erschließung der Einlagerungstunnel in den Einlagerungsfeldern III und IV.

3.1.2 MAW-Einlagerungsbereich

Der MAW-Einlagerungsbereich wird durch eine vom Hauptschacht ausgehende Strecke erschlossen. Diese Strecke wird nachfolgend als MAW-Einlagerungstransportstrecke bezeichnet. Die MAW-Einlagerungstransportstrecke hat eine Länge von ca. 300 m. Nach etwa 200 m vom Hauptschacht aus zweigen rechts und links von der MAW-Einlagerungstransportstrecke jeweils 4 Blindstrecken im Abstand von 20 m ab.

Diese Blindstrecken, mit einem Querschnitt von 6 x 6 m und eine Länge von 80 m, sind die Einlagerungskammern für den MAW. In den Blindstrecken werden die Abfallgebände, siehe Abb. 3.2, 2-lagig gestapelt. Die MAW-Einlagerungstranstrecke wird, wie auch die Umfahrung der HAW-Einlagerungsfelder so ausgebaut, dass sie den gebirgsmechanischen Belastungen über die Betriebszeit des Endlagers (ca. 50 Jahre) ohne weitere notwendige bergmännische Arbeiten standhält.

Das Konzept der MAW Einlagerung sieht vor, dass zur Vorbereitung der Einlagerung jeweils zwei gegenüberliegende Einlagerungskammern aufgeföhren und für die Einlagerung hergerichtet werden. Mit dem Abschluss der Vorbereitung und der aufsichtlichen Abnahme der beiden Einlagerungskammern erfolgt unmittelbar die Einlagerung. Die beiden Kammern werden in einer durchgehenden MAW-Einlagerungskampagne vollständig befüllt und verschlossen.

Der notwendige Querschnitt der Einlagerungskammern liegt bei ca. 36 m². Für einen Streckenquerschnitt in dieser Größenordnung im Tonstein sind gebirgsmechanische Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Einfache Sicherungsmaßnahmen, wie z.B. durch Anker und Maschendraht, sind nicht ausreichend. Abplatzungen von den Firsten bzw. den Stößen müssen zuverlässig vermieden werden, um einen ungestörten Einlagerungsbetrieb des schienengebundenen und automatisiert sowie fernbedient arbeitenden Einlagerungsfahrzeugs zu vermeiden. Als Sicherungsmaßnahme für die Einlagerungskammern wird daher ein einschaliger Ausbau, bestehend aus Ankern und Spritzbeton, geplant. Die Stärke des Spritzbetons beträgt etwa 25 cm. Die Sohle der Einlagerungskammer wird aus einer bewährten Betonplatte erstellt, in der die Schienen für das Einlagerungsfahrzeug verlegt werden (siehe Abbildung 4.5).

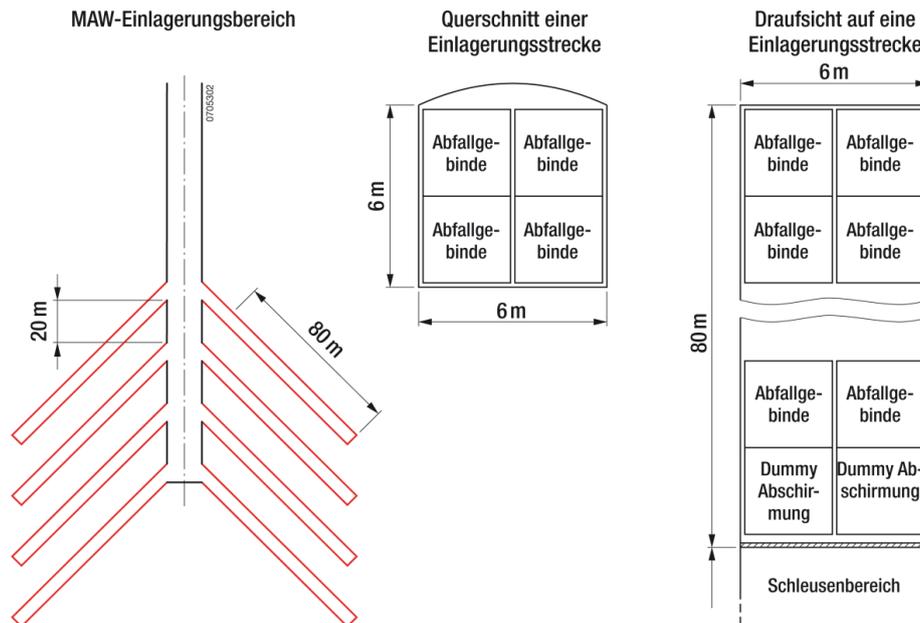


Abb. 3.2 Schematische Darstellung des MAW-Endlagerbereichs

3.1.3 Aufzufahrender Hohlraum

3.1.3.1 Grubengebäude

Einlagerungsbereich HAW

Ein Einlagerungstunnel für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle hat einen Durchmesser von 2,5 m und eine Länge von ca. 800 m. Für die Einlagerung der Abfallgebinde werden gemäß Tabelle 3.1 etwa 131 Einlagerungstunnel benötigt. Hieraus errechnet sich ein aufzufahrendes Hohlraumvolumen von ca. $5,1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$.

Einlagerungsbereich MAW

Die aufzufahrenden Einlagerungskammern für die MAW-Abfälle haben einen Querschnitt von ca. 43 m^2 . Nach dem einschaligen Ausbau der Strecken reduziert sich der Querschnitt auf gut 36 m^2 . Bei einer Gesamtlänge der Strecke von ca. 95 m, einschließlich der der Einlagerungskammer vorgelagerten Schleuse, und insgesamt acht Einlagerungskammern ergibt sich ein aufzufahrendes Hohlraumvolumen von etwa $3,3 \cdot 10^4 \text{ m}^3$.

Einlagerungstransportstrecke MAW

Für die MAW-Einlagerungstransportstrecke wird ein Querschnitt von 30 m^2 nach dem einschaligen Ausbau angenommen. Der aufzufahrende Querschnitt beträgt danach

etwa 36 m². Die Einlagerungstransportstrecke wurde mit einer Länge von 300 m veranschlagt. Hieraus ergibt sich ein aufzufahrender Hohlraum von etwa **1,1·10⁴ m³**.

Einlagerungstransportstrecke HAW

Auch für die HAW-Einlagerungstransportstrecke wird ein Querschnitt von 30 m² nach dem einschaligen Ausbau angenommen. Der aufzufahrende Querschnitt beträgt wie auch für die MAW-Einlagerungstransportstrecke etwa 36 m². Die Länge der HAW Einlagerungstransportstrecke beträgt etwa 2.700 m. Damit ergibt sich ein aufzufahrendes Hohlraumvolumen von etwa **3,9·10⁵ m³**

Bau- und Wetterstrecken

Der lichte Querschnitt der Wetterstrecken wird mit ca. 20 m² angenommen. Unter Berücksichtigung des notwendigen Streckenausbaus ergibt sich ein aufzufahrender Streckenquerschnitt von ca. 25 m². Die Gesamtlänge der Wetterstrecken beträgt etwa 3.400 m. Für die Wetterstrecken ist insofern insgesamt ein Hohlraumvolumen von etwa 8,5·10⁴ m³ aufzufahren. Für Baustrecke wird ein lichter Querschnitt von 8 m x 7 m angenommen. Unter Berücksichtigung des notwendigen Streckenausbaus ergibt sich ein aufzufahrender Querschnitt von ca. 64 m². Die Länge der beiden Baustrecken wird mit insgesamt 4.600 m veranschlagt. Dementsprechend wird für die Baustrecken ein Hohlraumvolumen von etwa 1,9·10⁵ m³ aufzufahren sein. Für die Bau- und Wetterstrecken wäre insofern insgesamt ein Hohlraumvolumen von etwa **3,0·10⁵ m³** aufzufahren.

Werkstatt- und Sozialbereiche

Für diese betriebstechnisch notwendigen Bereiche wird ein gegriffener Wert angesetzt. Es wird angenommen, dass der hier aufzufahrende Hohlraum in der gleichen Größenordnung wie der des MAW Einlagerungsbereiches einschließlich der MAW-Einlagerungstransportstrecke liegen wird. D.h., dass dieser Bereich mit einem aufzufahrenden Hohlraumvolumen von **4,5·10⁴ m³** veranschlagt wird.

Entsprechend den aufgeschlüsselten Bereichen ergibt sich für das Grubengebäude ein gesamtes aufzufahrendes Hohlraumvolumen von ca. **1,3 Mio. m³**.

Das eingelagerte Abfallbehältervolumen kann wie folgt abgeschätzt werden:

- **BE:** Ø: 1,05 m; L: 4,931 m; Anzahl: ca. 10.000 => **V_{BE} ca. 43.000 m³**
- **CSD-V:** Ø: 0,94 m; L: 2,0 m, Anzahl; ca. 3.600 => **V_{CSD-V} ca. 5.000 m³**
- **CSD-C/B:** kubische Behälter ; L: 2,5 m; Anzahl: 670 => **V_{CSD-C/B} ca. 10.500 m³**

Das gesamte eingelagerte Abfallgebände liegt damit bei etwa 60.000 m³, d.h., dass etwa 5 % des aufgefahrenen Hohlraums des Bergwerks mit radioaktiven Abfällen gefüllt werden. Dieses Verhältnis würde sich auch nicht nennenswert ändern, wenn die für die VerSi-Endlagerplanung unberücksichtigt gebliebenen Abfallgebände, z.B. AVR- und THTR-Abfälle, berücksichtigt würden.

3.1.3.2 Schächte

In der letzten Ausbauphase wird das Endlagerbergwerk über drei Schächte verfügen. Der zentrale Schacht, über den die Abfallgebände nach unter Tage transportiert werden, wird mit einer Teufe von 500 m sowie einem Durchmesser von 9 m veranschlagt. Dieser Durchmesser ist höher als der spätere lichte bzw. ausgebaute Schachtdurchmesser von etwa 7,50 m. Damit ist für den zentralen Schacht ein Hohlraumvolumen von ca. **3,2·10⁴ m³** aufzufahren.

Die beiden anderen Schächte dienen dem Materialtransport, der Seilfahrt und als einziehende Wetterschächte. Für diese Schächte wird ein aufzufahrender Durchmesser von 6,50 m angesetzt. Der lichte Durchmesser im ausgebauten Zustand der Schächte wird mit ca. 5,00 m veranschlagt. Die Teufe dieser Schächte liegt, wie auch beim Hauptschacht bei 500 m. Daraus ergibt sich ein aufzufahrendes Hohlraumvolumen für die beiden Schächte von ca. **3,3·10⁴ m³**.

Für die drei Schächte sind insgesamt ca. **5,5·10⁴ m³ Hohlraum** aufzufahren.

3.1.4 Bewetterung

Die einfache Strukturierung des Endlagerbergwerks erlaubt eine einfache Strukturierung der Bewetterungsströme. Einziehender Wetterschacht ist in der ersten Ausbaustufe (Auffahrung und Betrieb der HAW-Einlagerungsfelder I und II sowie des MAW-Bereichs) der Schacht 1. In der zweiten Ausbaustufe kommt der Schacht 2 entsprechend hinzu. Ausziehender Wetterschacht für alle Abwetter ist der Hauptschacht.

- **Bewetterung des HAW-Einlagerungsbereichs**

Die in das Grubengebäude über die Schächte 1 bzw. 2 eingeleiteten Frischwetter werden im Bereich der Einlagerungssohle in zwei Hauptwetterströme aufgeteilt. Ein Wetterstrom wird in die Baustrecke, in Abb. 3.2 grün dargestellt, geleitet. Der zweite Wetterstrom gelangt über die sogenannten Wetterstrecken, in Abb. 3.1 blau dargestellt, in

die Einlagerungstransportstrecken. Die Abfolge der Befüllung der Einlagerungstunnel läuft der Wetterrichtung entgegen. Die Einlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgt automatisiert und fernbedient. Eine Bewetterung der Einlagerungstunnel sowie der davor liegenden Schleusen erfolgt nicht. Da die Einlagerungstransportstrecken im bestimmungsgemäßen Betrieb vom Betriebspersonal nicht befahren werden, ist die notwendige Wettermenge in diesen Strecken vergleichsweise gering.

- **Bewetterung des MAW-Einlagerungsbereichs**

In den MAW-Einlagerungskammern werden die Abfallgebinde automatisiert und fernbedient endgelagert. Eine Bewetterung dieser Einlagerungskammern ist nicht erforderlich. Die MAW-Einlagerungstransportstrecke wird saugend bewettert. Die Frischwetter werden über Lutten entlang der Baustrecken zugeführt. Die Abwetter aus dem MAW-Bereich werden über Lutten zum Hauptschacht gefördert.

3.2 Thermische Eigenschaften im HAW-Einlagerungsbereich

Bestimmend für den Wärmeeintrag in den ewG sind die entsprechenden Eigenschaften des radioaktiven Abfalls. Die entsprechenden Charakteristika sind in Kapitel 2 dargestellt. Zur Vermeidung von Umkristallisierungsvorgängen im Tonstein muss die geometrische Auslegung des Einlagerungsbereiches für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle darüber hinaus gewährleisten, dass der Tonstein an keiner Stelle über 100 °C erwärmt wird. Für die modellmäßige Berechnung der Endlagerauslegung in diesem Bereich sind die thermischen Eigenschaften der Behälter, des Versatzmaterials (Bentonite) sowie des Tonsteins ausschlaggebend. Die thermische Leitfähigkeit sowie die Wärmekapazität dieser Materialien ist entsprechend /NAG 02b/ in der nachfolgenden Tabelle 3.2 dargestellt.

Die Daten der Tabelle 3.2 wurden z.T. unmittelbar aus /NAG 02b/ entnommen bzw. im Hinblick auf die thermischen Eigenschaften des Wirtsgestein auf die Verhältnisse für den generischen Tonsteinstandort in Norddeutschland angepasst. Für die geometrische Auslegung des Endlagers gilt die Randbedingung, dass am Übergang des Bentonitgranulats/-blocks und dem anstehenden Tonstein die Temperatur $T < 100$ °C betragen muss. Der Bentonit wird aus thermischer Sicht als Opferstrecke angesehen. Das heißt, dass am Punkt H5 in Abb. 3.3, die Temperatur < 100 °C betragen muss. Die Auslegung der Endlagerbehälter berücksichtigt diese Anforderung.

Tab. 3.2 Thermische Eigenschaften von Stahl, Bentonit und Tonstein

Material	Thermische Leitfähigkeit [W/m·K]	Wärmekapazität [MJ/m ³ ·K]
Stahl	52	3,05
Bentonit (2 % Restfeuchte)	0,4	1,2
Bentonite (saturiert)	1,35	2,4
Tonstein (EDZ 0,5 m)	1,5	2,3
Tonstein (ewG)	3 (horizontal) 2 (vertikal)	2,3

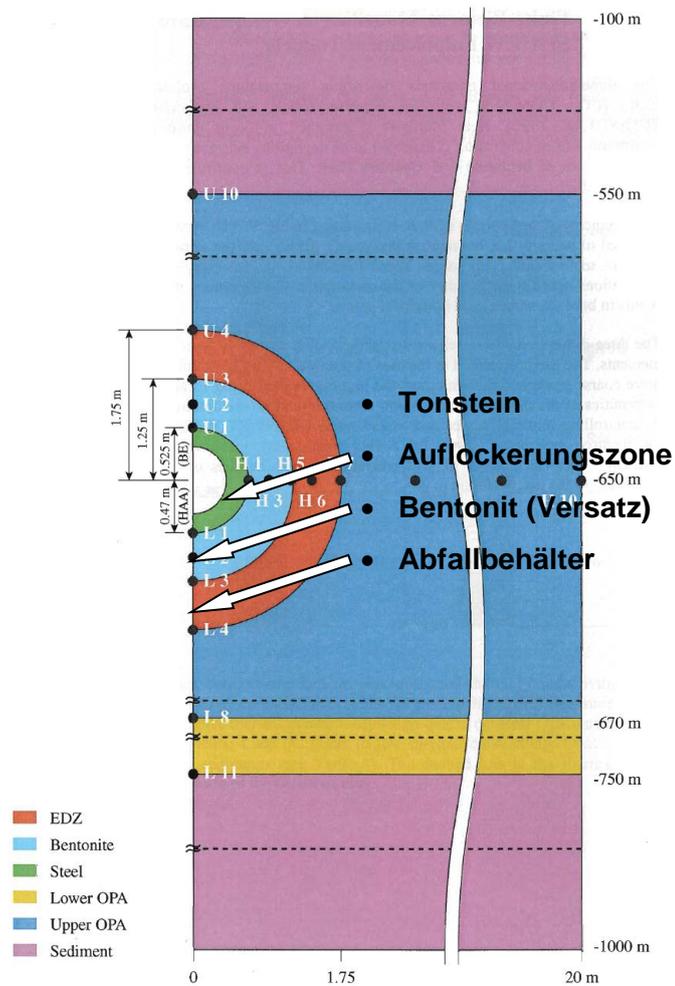


Abb. 3.3 Schematische Darstellung (vertikaler Schnitt) der Einbettung der hochradioaktiven Abfälle in das Wirtsgestein /NAG 02b/

4 Endlagerungsbetrieb

4.1 Betriebsdauer

Unter Berücksichtigung des in /NAG 02a/ skizzierten Einlagerungsbetriebs wird im Mittel eine Einlagerungsfrequenz von einem HAW-Abfallgebinde pro Einlagerungsschicht veranschlagt. Bei etwa 14.000 einzulagernden Abfallgebänden und 200 Arbeitstagen pro Jahr ergibt sich eine Betriebszeit von etwa 70 Jahren. Unterstellt man einen zweischichtigen Einlagerungsbetrieb, so würde sich die notwendige Betriebsdauer für die Einlagerung auf etwa 35 Jahre reduzieren. Für das Endlagerkonzept im Tonstein wird unterstellt, dass aufgrund von Errichtungsarbeiten, die nicht parallel zum Einlagerungsbetrieb durchgeführt werden können, sowie auftretenden Betriebsstörungen ein durchgehender zweischichtiger Einlagerungsbetrieb nicht möglich sein wird. Die Betriebsdauer für die Einlagerungsphase wird daher mit etwa 50 Jahren veranschlagt werden.

4.2 Grundzüge des Einlagerungsbetriebes

4.2.1 Handhabungsvorgänge über Tage

Die Abfallgebände werden in Transportbehältern (Typ-B Zulassung) an das Endlager angeliefert. Nach der Überprüfung der Transportpapiere und einer sondierenden Strahlenschutzmessung (Dosisleistung, Kontaminationsüberprüfung) am Waggon mit den Abfallgebänden wird dieser an der Grenze zum Betriebsgelände von einer anlageninternen Lok übernommen und vor der Umladeanlage bereitgestellt. Im Falle anliefernder LKW werden die Transportpapiere bei der Einfahrt auf das Anlagengelände überprüft, es erfolgt die sondierende Strahlenschutzmessung und danach fährt der LKW auf eine vorgegebene Bereitstellungsposition vor der Umladeanlage.

Die Annahme- und Einlagerungslogistik ist so konzipiert, dass pro Einlagerungsschicht ein Abfallgebinde angeliefert und eingelagert wird. Um auf mögliche Störungen im Anlieferungsbetrieb oder Betriebsstörungen im Endlager reagieren zu können, steht eine Pufferhalle zur Verfügung. Bei längeren Störungen wird der Anlieferungsbetrieb gestoppt.

Nach dem Abruf von Einlagerungstransporten von der Bereitstellung werden diese durch eine Trocknungsanlage in die Umladehalle auf eine vorgegebene Position ver-

fahren und dort gegen ein unbeabsichtigtes Verfahren gesichert. Eisenbahnwaggons werden von einem anlageninternen Triebwagen in die Umladehalle verschoben. Die Transportabdeckung des Anlieferungsfahrzeugs wird entfernt. Vor der Entfernung der Transportsicherungen erfolgt die Eingangskontrolle (Behälteridentifikation und radiologische Messungen) am Transportbehälter. Soweit der Transportbehälter für die Annahme akzeptiert wird, werden die Transportsicherungen entfernt. Der Transportbehälter wird an das Hebewerkzeug eines Brückenkranes angeschlagen. Der Kran hebt das Abfallgebinde an, verfährt es zu einem Plateauwagen und legt den Transportbehälter auf diesem ab. Sobald der Umladevorgang auf den Plateauwagen abgeschlossen ist, kann das Anlieferungsfahrzeug die Umladehalle verlassen. Die beladenen Plateauwagen werden unmittelbar zum Schachttransport (Regelfall) bzw. im Ausnahmefall in die Pufferhalle verschoben. Gepuffert wird der Plateauwagen mit dem Transportbehälter. Der Transportbehälter mit dem Abfallgebinde wird erst zur Einlagerung vom Plateauwagen genommen. Das Verschieben der Plateauwagen (gleisgebunden) erfolgt in Längsrichtung mit einem umlaufenden Seil-/Kettensugsystem und seitlich mit einem Querverschub.

Im bestimmungsgemäßen Endlagerbetrieb werden die verschiedenen Handhabungsschritte mit den Abfallgebinden, beginnend mit der Umladung der Transportbehälter vom Anlieferungsfahrzeug auf den innerbetrieblichen Plateauwagen bis hin zum eigentlichen Einlagerungsvorgang, automatisiert und fernbedient erfolgen. Der Aufenthalt von Betriebspersonal im unmittelbaren Strahlungsfeld der Abfallgebinde wird auf ein Minimum reduziert.

4.2.2 Schachttransport

Die Massen der schwersten Transportbehälter erfordern eine Schwerlast-Schachtförderanlage. Die Nutzlasten werden im Bereich von max. 100 Mg liegen. Vorstellbar ist eine Anlage, wie sie z.B. Anfang der neunziger Jahre im Rahmen der PAE-Studie /DBE 94/ entwickelt wurde. Auslegungsmerkmale sind z.B. acht Förderseile, zwei unabhängige Bremssysteme, eine elektronische Steuerung sowie SELDA-Systeme im Bereich der Rasenhängebank und des Füllortes.

4.2.3 Handhabungsvorgänge unter Tage

– Einlagerung von HAW-Abfallgebinden

HAW-Abfallgebinde werden auf der Einlagerungssohle von einer Grubenlok vom Förderkorb abgezogen und in die Schleuse der betreffenden Einlagerungstunnel gezogen. In der Schleuse wird der Transportbehälter geöffnet und das Abfallgebinde wird mittels Videotechnik einer abschließenden optischen sowie einer radiologischen Kontrolle unterzogen. Bleibt das Abfallgebinde bei dieser letzten Kontrolle unbeanstandet, gilt das Abfallgebinde als angenommen. Kann das Abfallgebinde nicht eingelagert werden, wird der Transportbehälter wieder geschlossen und zurück nach über Tage gebracht. In einer heißen Zelle über Tage werden die Ursachen für die Abweichungen festgestellt und danach wird die weitere Vorgehensweise bezüglich dieses Abfallgebindes festgelegt.

Ein angenommenes Abfallgebinde wird auf das Einlagerungsfahrzeug, das auf einem parallelen Gleis steht, umgeladen, siehe hierzu auch Abb. 4.1. Das Abfallgebinde wird aufgrund der räumlichen Verhältnisse in der Schleuse bei der Umladung in einer maximalen Höhe von 1,2 m über dem Boden gehandhabt. Wenn das beladene Einlagerungsfahrzeug abfahrbereit ist, wird das innere Schleusentor zur Einlagerungsstrecke geöffnet und das Transportfahrzeug fährt in die Einlagerungsstrecke. Das Einlagerungsfahrzeug bewegt sich gleisgebunden, diese Gleise werden entsprechend des Einlagerungsfortschritts nicht zurückgebaut und verbleiben in der Strecke.

Das Einlagerungsfahrzeug transportiert das Abfallgebinde zu den im Vorfeld des Einlagerungsvorgangs eingebrachten Bentonitblöcken und legt es auf diesen ab. Der Abstand zwischen den Abfallgebinden in dem Einlagerungstunnel beträgt mindestens 3 m. Nach erfolgter Einlagerung wird die nächste Einlagerung durch das vollständige Versetzen des eingelagerten Abfallgebindes mit Bentonitgranulat und dem Aufstellen neuer Bentonitablageböcke vorbereitet. Sobald ein Einlagerungstunnel vollständig befüllt ist, wird der Einlagerungstunnel im Bereich der Schleuse vollständig versiegelt.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 4.1 bis Abb. 4.3) sind die Betriebsvorgänge der Einlagerung von HAW-Abfallgebinden ab dem Bereich der Schleuse vor dem Einlagerungstunnel und das Versetzen der Abfallgebinde mit Bentonitgranulat dargestellt.

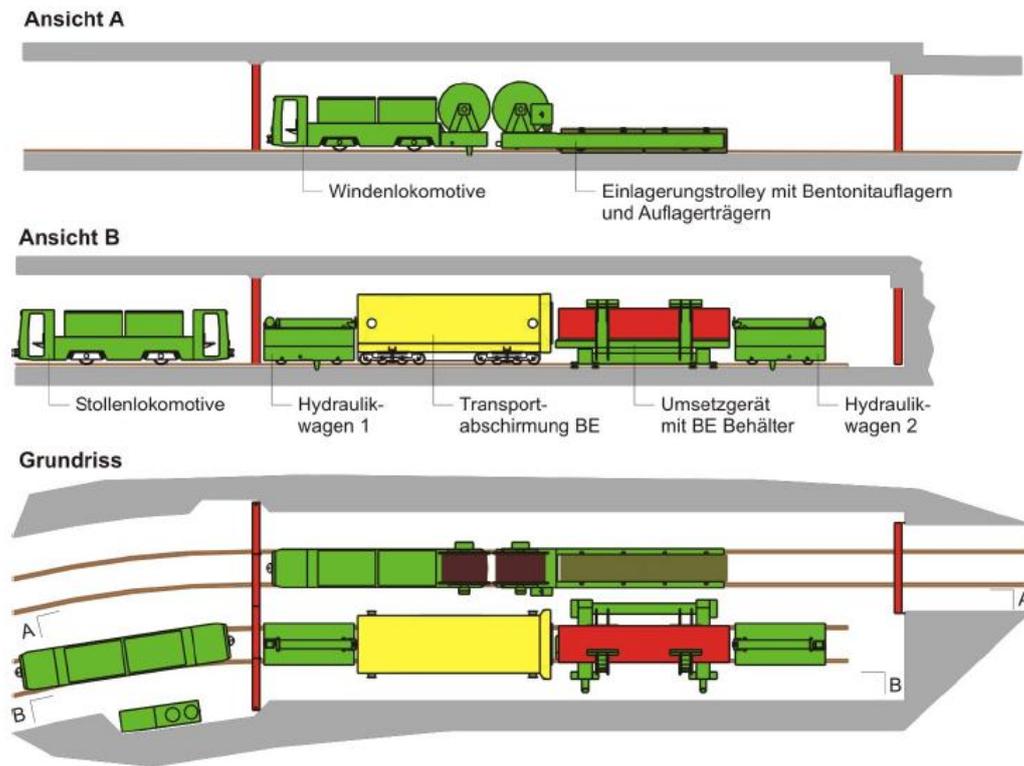


Abb. 4.1 Verfahrensablauf zur Endlagerung von HAW-Abfallgebinden im Bereich der Schleuse vor dem Einlagerungstunnel /NAG 02a/

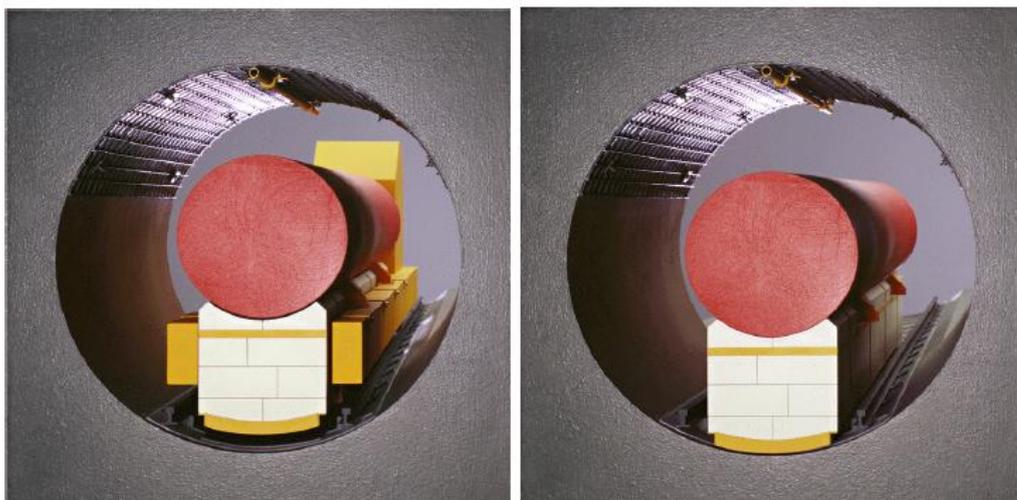


Abb. 4.2 Schematische Darstellung der Einlagerung von HAW-Abfallgebinden /NAG 02a/

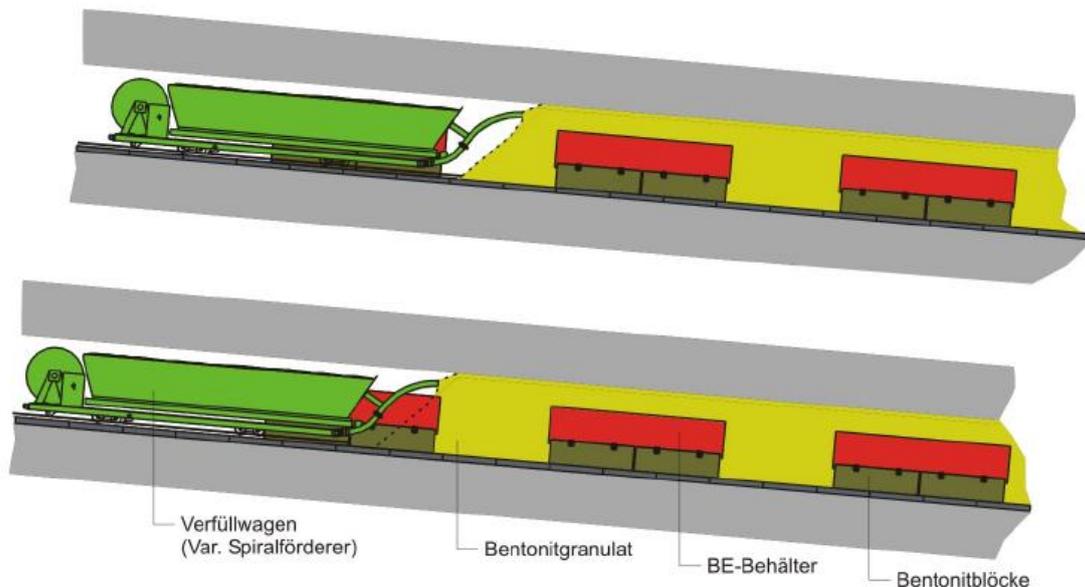


Abb. 4.3 Schematische Darstellung des Versetzens eingelagerter HAW-Abfallgebinde /NAG 02a/

In der Schweizer Machbarkeitsstudie für ein HAW-Endlager im Opalinuston wird aufgrund der bekannten geologischen Verhältnisse geplant, dass die Einlagerungstunnel dem Einfallen der Tonschichten folgen. Hieraus ergibt sich für die Einlagerungstunnel ein Gefälle von etwa 6 %, siehe auch Abb. 4.3. Für das synthetische Endlagerkonzept im Tonstein wird eine horizontale Lage der Einlagerungstunnel unterstellt.

Sobald ein Einlagerungstunnel vollständig mit Abfallgebinden befüllt wurde, wird dieser Tunnel im Bereich der Schleuse mit einem Abdichtbauwerk versehen und gegenüber der Schleuse bzw. der Einlagerungstransportstrecke abschließend versiegelt. Die Systemtechnik wird aus der Schleuse abgebaut und kann zur Einlagerung in nachfolgenden Schleusen wieder verwendet werden. Nachdem das letzte HAW-Einlagerungsfeld (IV) vollständig befüllt wurde und der entsprechende Einlagerungstunnel versiegelt wurde, besteht durchgängig noch die Umfahrung um die HAW-Einlagerungsfelder. Diese Strecken sind ohne besondere radiologische Schutzmaßnahmen begehb- bzw. befahrbar. Die Entscheidung zum endgültigen Verschluss des Endlagerbergwerks kann ab diesem Zeitpunkt getroffen werden.

– **Einlagerung von MAW-Abfallgebinden**

Der Vorgang der Einlagerung von MAW-Abfallgebinden im vorliegenden Tonkonzept orientiert sich an der französischen Machbarkeitsstudie *“Dossier Argile 2005“* /AND 05/ für ein HAW Endlager im Tonstein.

Der Start des Einlagerungsbetriebs in dem generischen Endlager ist so geplant, dass zunächst die beiden hinteren bzw. gegenüberliegenden Einlagerungskammern des MAW-Einlagerungsfeldes, siehe Abb. 4.4, mit Abfallgebinden vollständig befüllt werden, bevor mit der Einlagerung von Abfallgebinden im ersten HAW-Einlagerungsfeld begonnen wird. Entsprechend der Strukturierung der Einlagerungsbereiche im Endlager wiederholt sich dieser Vorgang dreimal, bevor das Endlager vollständig befüllt ist. Vollständig befüllte MAW-Einlagerungskammern werden gegenüber der MAW-Einlagerungstransportstrecke mit einem Abschlussbauwerk versehen und abgedichtet. Die MAW-Einlagerungstransportstrecke wird erst mit der Entscheidung zum vollständigen Verschluss des Endlagers versetzt.

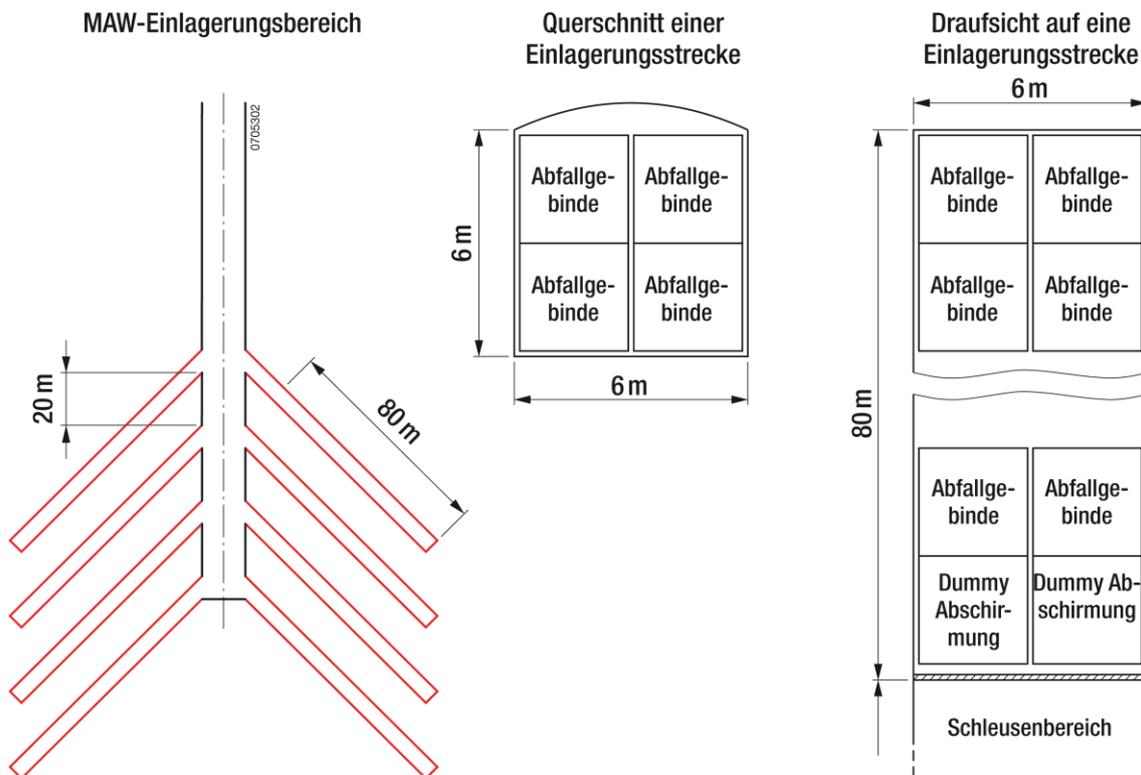


Abb. 4.4 Skizze des MAW-Einlagerungsbereichs (siehe Abb. 3.1 für den Anschluss an das Grubengebäude)

Plateauwagen mit MAW Abfallgebinden werden am Füllort mit einer Grubenlok vom Förderkorb abgezogen und über die MAW-Einlagerungstransportstrecke in die Schleuse der entsprechenden Einlagerungskammer transportiert. In der Schleuse wird der Transportbehälter geöffnet und das Einlagerungsfahrzeug hebt das Abfallgebinde vom Plateauwagen. Das Einlagerungsfahrzeug für MAW Abfallgebinde entspricht vom Grundbau einem Gabelstapler. Das Fahrzeug bewegt sich schienenengebunden in die Einlagerungskammer zum Einlagerungsort. Während des Transports ist die Absturzhöhe auf unter 0,5 m begrenzt. Die max. Transportgeschwindigkeit beträgt 4 m/s. Beim Ablegen eines Abfallgebindes auf ein anderes beträgt die Handhabungshöhe über Sohle max. 2,8 m. Nach erfolgter Einlagerung fährt das Einlagerungsfahrzeug in die Schleuse zurück, das innere Schleusentor wird verschlossen und der Plateauwagen mit dem leeren Transportbehälter wird zum Füllort gefahren und nach über Tage transportiert. Die Einlagerung in einer Einlagerungstrecke wird durch den Einbau von 2 x 2 nur mit Beton gefüllten Abfallbehältern (Dummys) abgeschlossen. Eine schematische Darstellung der Einlagerung von MAW Abfallgebinden ergibt sich aus Abb. 4.5. Nach dem Einbau der nur mit Beton verfüllten Abfallgebinde wird die Einlagerungskammer durch ein Abschlussbauwerk verschlossen und gegenüber der Schleuse bzw. MAW-Transportstrecke abgedichtet. Danach wird die in der Schleuse installierte Betriebs-technik demontiert und für den Einbau in die nächste Schleuse vorgehalten.

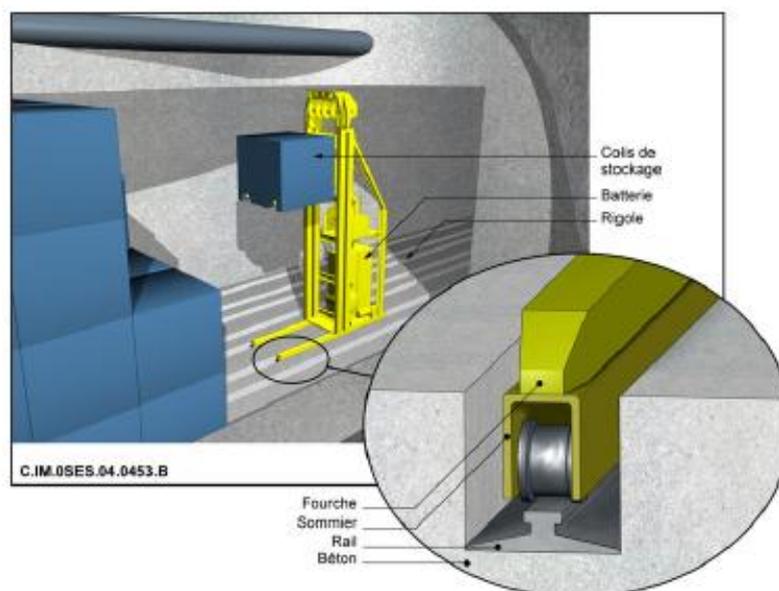


Abb. 4.5 Schematische Darstellung der Einlagerung von MAW-Abfallgebinden /AND 05/

4.3 Rückbau und Verschlussmaßnahmen im Einlagerungsbetrieb

Das Ziel der Endlagerung ist die langfristig sichere und dauerhafte Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre. Zur Vermeidung bzw. zur Reduktion von chemischen Prozessen, wie z.B. Korrosion, Gasbildung und Wechselwirkungen zwischen in das Bergwerk eingebrachten sonstigen Stoffen und den radioaktiven Abfällen aber auch zur Reduktion der in das Endlager eingebrachten chemotoxischen Stoffe sollte die in das Endlager installierte Betriebstechnik zum Ende der Betriebsphase weitestgehend zurück gebaut werden. Dieser Rückbau muss sich allerdings auch daran orientieren, was technisch sinnvoll machbar und ggf. radiologisch vertretbar ist.

In den Einlagerungsbereichen für hoch- und mittelradioaktive Abfälle verbleiben neben den gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen die Schienen, die für die Einlagerungsfahrzeuge benötigt wurden. Die gesamte Betriebstechnik, die sich in den Schleusen vor den Einlagerungshohlräumen befand, wird über die Betriebsphase ausgebaut um sie für die weitere Einlagerung in anderen Hohlräumen verwenden zu können. Am Ende der Betriebsphase kann die Betriebstechnik, die sich noch unter Tage befindet, hinsichtlich einer Kontamination und Aktivierung überprüft werden. Es ist davon auszugehen, dass ein Teil der Betriebstechnik unmittelbar aus der atomrechtlichen Überwachung freigegeben werden kann, für einen anderen Teil wird dies erst nach einer Dekontamination möglich sein. Nur solche Teile der Betriebstechnik, die nicht oder nur mit einem nicht vertretbaren Aufwand zu dekontaminieren sind, verbleiben als radioaktive Betriebsabfälle im Endlager. Bei diesen Betriebsabfällen wird es sich durchweg um schwachradioaktive Abfälle handeln. Für die radioaktiven Betriebsabfälle ist ein separater Einlagerungsbereich, z.B. im Bereich der ehemaligen aktiven Werkstatt, zu identifizieren. Zum Ende der Stilllegungsphase und bevor mit dem Verschluss des Bergwerkes begonnen wird, ist dieser Einlagerungsbereich gegenüber den Zufahrtsstrecken abzudichten.

Die Einlagerungstunnel für HAW und bestrahlte Brennelemente bzw. die Kammern für MAW werden nach ihrer vollständigen Befüllung noch während des Einlagerungsbetriebs mit entsprechenden Bauwerken abgedichtet. Die Abdichtbauwerke erfüllen die technischen Anforderungen, die sich aus dem Verschlusskonzept ergeben. In der Stilllegungsphase sind bezüglich der bereits errichteten Abdichtbauwerke keine weiteren Arbeiten erforderlich. Eine schematische Darstellung des sandwichartigen Aufbaus eines Abdichtelements für einen HAW- Einlagerungstunnel ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

5 Stilllegung / Verschluss des Endlagers

5.1 Verfüllung und Abdichtung der Einlagerungshohlräume

HAW-Einlagerungsfelder I bis IV

Die HAW-Einlagerungstunnel werden über die so genannte Baustrecke, siehe Abb. 3.1, aufgefahren. Nachdem ein Einlagerungstunnel durchschlägig bis zur Einlagerungsstrecke gebohrt und ausgebaut ist, wird dieser gegenüber der Baustrecke verschlossen und abgedichtet (Versiegelung). Der Einlagerungstunnel stellt danach eine Blindstrecke dar, die nur von der Einlagerungstransportstrecke aus zugänglich ist. Der Aufbau der Versiegelung eines Einlagerungstunnels gegenüber der Baustrecke ist identisch mit der Versiegelung eines Einlagerungstunnels unmittelbar nach seiner vollständigen Befüllung mit HAW-Abfallgebinden. Eine graphische Darstellung des Aufbaus einer Versiegelung im Bereich der Einlagerungstransportstrecke ist in Abb. 5.1 dargestellt /NAG 02a/. Durch die Abdichtbauwerke der Einlagerungstunnel im Bereich der Einlagerungstransport- und der Baustrecke reduziert sich die für die Einlagerung nutzbare Tunnellänge auf effektiv ca. 750 m.

Während der Betriebsphase des Endlagers nehmen die Versiegelungen folgende Funktionen wahr /NAG 02a/:

- Verhinderung eines Wasserzuflusses aus der Bau- bzw. Einlagerungstransportstrecke
- Verhinderung eines Personenzugangs zu den eingelagerten Abfällen (Safeguards)
- Betrieblicher Strahlenschutz

Im Hinblick auf die Nachbetriebsphase müssen die Versiegelungen weitere sicherheitstechnische Funktionen übernehmen. Hierzu gehört insbesondere die Dichtfunktion und der Lastabtrag gegenüber eines aus dem Einlagerungstunnel oder der Einlagerungstransport bzw. Baustrecke auftretenden Flüssigkeitsdrucks.

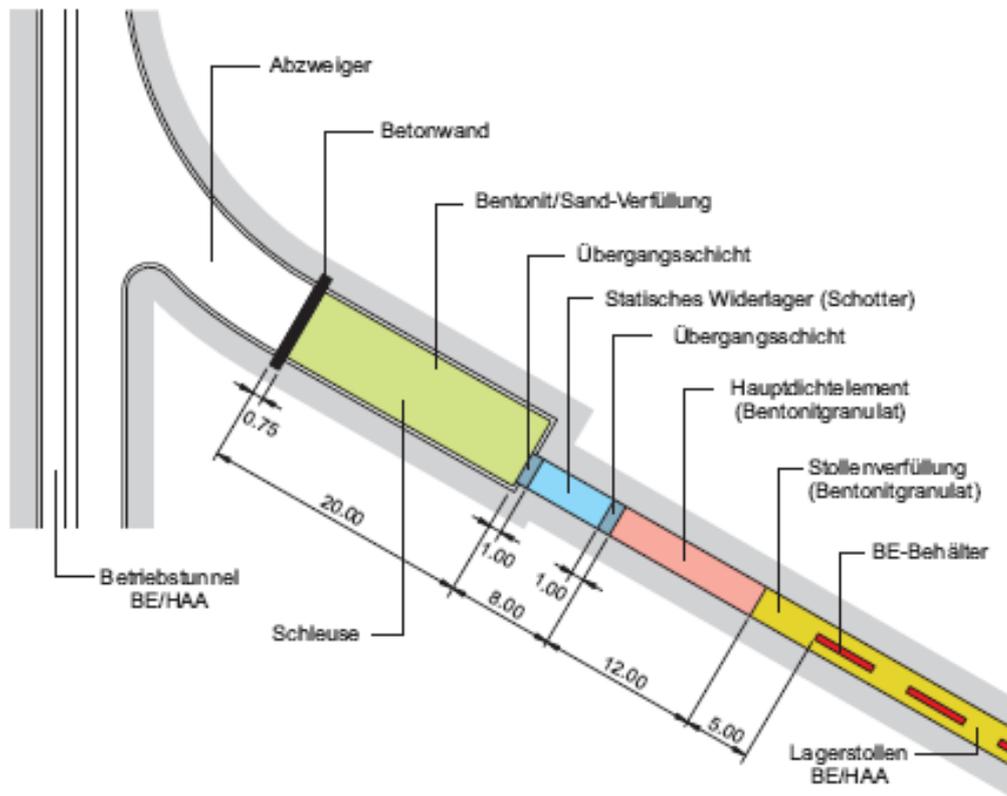


Abb. 5.1 Schematische Darstellung der Versiegelung einer HAW-Einlagerungsstrecke /NAG 02a/

Die Versiegelungen, wie sie in Abb. 5.1 dargestellt sind, sind sandwichartig aufgebaut. Die Dichtelemente bestehen aus Bentonitgranulat (Abb. 5.1: Einfärbung rosa) und einer Mischung aus Bentonit und Sand (Abb. 5.1: Einfärbung grün). Der Lastabtrag erfolgt über eine Schotterkiespackung, die zwischen den Dichtelementen eingebaut ist. Gegenüber der Einlagerungstransport- bzw. der Baustrecke wird die Versiegelung durch eine Betonwand geschützt. Diese Betonwand hat eine Schutzfunktion für die Versiegelung bis zum Zeitpunkt der Verfüllung der jeweiligen Strecke. Im Bereich der Einlagerungstransportstrecke bzw. der dort eingebauten Versiegelungen werden die zur Einlagerung verlegten Schienenstränge vollständig entfernt.

Die betriebliche Vorgehensweise impliziert, dass am Ende der Betriebsphase alle Einlagerungstunnel mit den beschriebenen Versiegelungsbauwerken gegenüber den noch bestehenden Infrastrukturstrecken abgedichtet sind.

MAW-Einlagerungsbereich

Der Betriebsablauf sieht vor, dass vor der Aufnahme der HAW-Einlagerung in einem Einlagerungsfeld zwei gegenüberliegende MAW-Einlagerungskammern, siehe Abb. 3.2, mit MAW-Abfallgebänden vollständig verfüllt werden. Das in den MAW-Einlagerungsstrecken zwischen den Abfallgebänden verbleibende Hohlraumvolumen wird mit Zementmörtel versetzt. Bei den letzten Abfallgebänden, die in eine Einlagerungsstrecke eingelagert werden, handelt es sich um mit Beton gefüllte Abfallgebände, mit denen die Einlagerungsstrecke strahlenschutztechnisch abgesichert wird (Dummies), siehe Abb. 4.4. Wenn die Einlagerung in beiden Einlagerungskammern abgeschlossen ist, werden alle technischen Systeme, einschließlich der Schienen aus den Einlagerungskammern vorgelagerten Schleusen, ausgebaut. Danach wird in den Schleusen über den gesamten Querschnitt eine Betonwand erstellt. Am Ende der Betriebsphase, wenn alle MAW-Abfallgebände eingelagert sind, ist nur noch die MAW-Einlagerungstransportstrecke offen. Eine schematische Darstellung des MAW-Einlagerungsbereichs zu diesem Zeitpunkt zeigt die Abbildung 5.2.

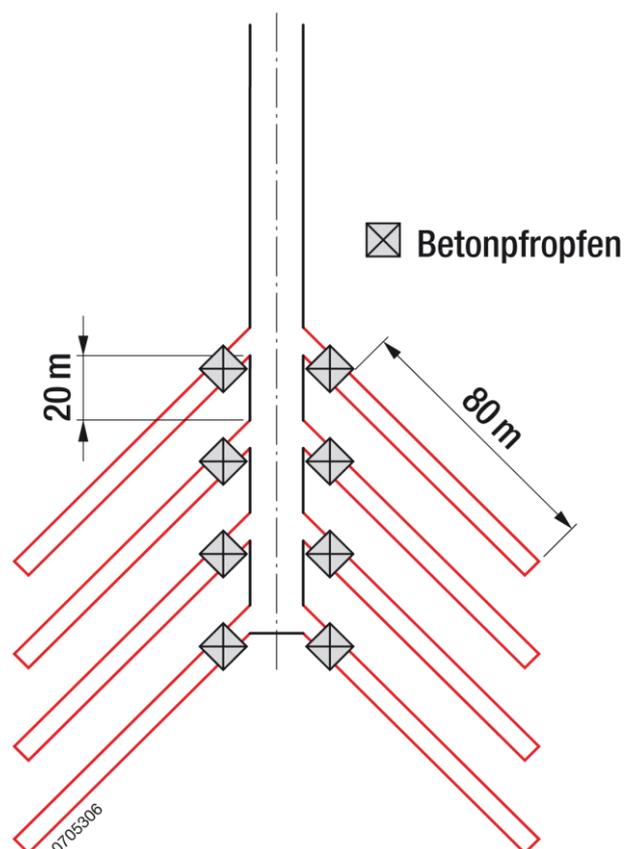


Abb. 5.2 Zustand des MAW-Einlagerungsbereichs am Ende der Einlagerungsphase

Während der Betriebsphase des Endlagers nimmt der Verschluss der MAW-Einlagerungskammern folgende Funktionen wahr:

- Verhinderung eines Wasserzuflusses in die Einlagerungskammern aus der Bau- bzw. Einlagerungstransportstrecke
- Verhinderung eines Personenzugangs zu den eingelagerten Abfällen (Safeguard bzw. physischer Schutz)
- Betrieblicher Strahlenschutz

5.2 Hohlraumvolumen am Ende der Betriebsphase

Der Zustand des Endlagerbergwerks am Ende der Betriebsphase kann wie folgt charakterisiert werden:

- Die HAW-Einlagerungstunnel sind vollständig verfüllt und abgedichtet.
- Die MAW-Einlagerungskammern sind vollständig verfüllt und abgedichtet.
- Die Umfahrungen der vier HAW-Einlagerungsfelder in Form der Einlagerungstransportstrecken, der Wetterstrecken sowie der Baustrecke sind offen und können befahren werden.
- Die MAW-Einlagerungstransportstrecke ist offen und kann befahren werden.
- Der Werkstatt- und Sozialbereich ist offen und die vorhandene Infrastruktur wird genutzt.

Die zu diesem Zeitpunkt noch offenen Hohlräume, im Wesentlichen handelt es sich um Strecken, sind insgesamt mit einem gebirgsmechanischen Ausbau versehen. Dieser Ausbau verbleibt im Berg und wird nur im Bereich von Abdichtbauwerken rückgebaut. Im Bergwerk fest installierte Systemtechnik, wie z.B. die Schienen in den Einlagerungstransportstrecken, wird nur im Bereich der zu errichtenden Abdichtbauwerke zurückgebaut. Die mobile Systemtechnik wird soweit freimessbar aus dem Bergwerk entfernt. Nicht freimessbare Systemtechnik und sonstiger radioaktiver Betriebsabfall wird an einer geeigneten Stelle im Werkstattbereich endgelagert.

Entsprechend der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Dimensionierung der Hohlräume des Grubengebäudes ergibt sich für das Ende der (Einlagerungs-)Betriebsphase ein noch bestehender bzw. zu verfüllender Hohlraum von knapp **7,5·10⁵ m³**. Dieser verbleibende Hohlraum entspricht etwa 55 % des ursprünglich vorhandenen Hohlraums.

5.3 Verfüllung und Abdichtung von Strecken

Die um die HAW Einlagerungsfelder herumlaufenden Strecken, hierzu gehören die Bau-, Wetter- und Einlagerungstranstrecken, siehe auch Abb. 3.1, werden erst im Zuge der Stilllegung des Endlagers versetzt. Als Versatzmaterial dient ein Bentonit/Quarzsand-Gemisch. Die Maßnahmen zur geomechanischen Stabilisierung der Strecken verbleiben, wie auch die Schienen, in den Strecken. Der Versatz der Strecken geht mit der Errichtung von Abdichtbauwerken an so genannten Schlüsselpositionen einher. In Abbildung 5.3 sind diese Schlüsselpositionen schematisch dargestellt. Im Bereich der Abdichtbauwerke wird der gesamte Streckenausbau entfernt, so dass die Abdichtung und Versiegelung gegenüber dem natürlichen Gebirge erfolgt. Der Versatz der Strecken geht mit der Errichtung von Abdichtbauwerken an so genannten Schlüsselpositionen einher.

Die MAW-Einlagerungstranstrecke wird analog den umlaufenden Strecken um die HAW-Einlagerungsfelder verfüllt. Das Versiegelungsbauwerk wird hier zwischen dem Hauptschacht und den MAW-Einlagerungskammern errichtet. Auch in diesem Bereich werden alle Ausbaumaßnahmen in der Strecke entfernt. Die Verfüllung der Strecken und die Versiegelungsbauwerke übernehmen mittel- und langfristig Funktionen:

- Verhinderung eines Wasserzuflusses aus bzw. in die Strecken.
- Geomechanische Stabilisierung des Bergwerks
- Verhinderung eines Personenzugangs zu den eingelagerten Abfällen solange die Schächte noch nicht versiegelt und verfüllt sind.

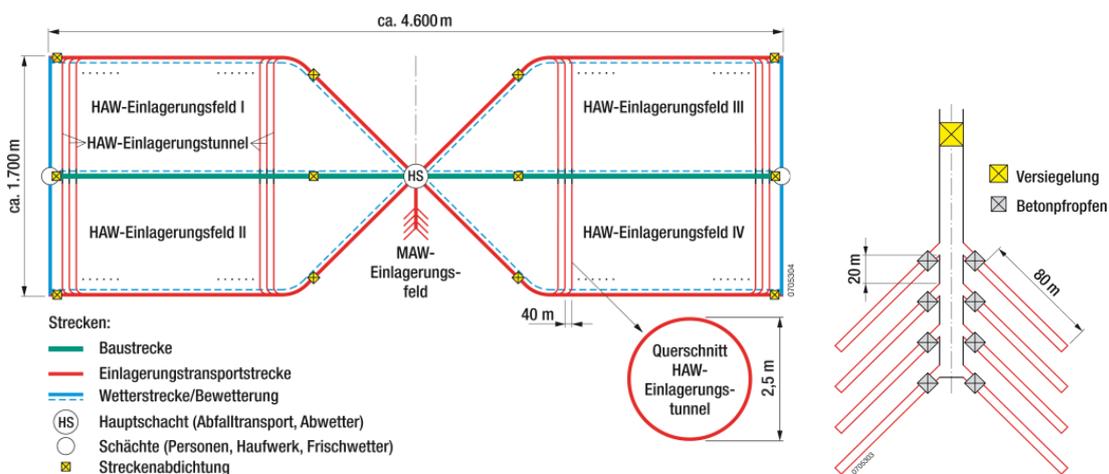


Abb. 5.3 Abdichtbauwerke an Schlüsselpositionen des generischen Endlagerkonzeptes

5.4 Verfüllung des Infrastrukturbereiches

Der Infrastrukturbereich, der die Werkstätten und weiteren Servicebereiche umfasst, ist der letzte verbleibende Hohlraum des Grubengebäudes der im Rahmen der Stilllegung des Bergwerks versetzt wird. Nicht freimesbare Systemtechnik und sonstiger radioaktiver Betriebsabfall werden an einer geeigneten Stelle im Werkstattbereich endgelagert. Dieser Bereich wird gegen den übrigen Infrastrukturbereich abgedichtet. Der übrige Hohlraum, der keine direkte Verbindung zu den Einlagerungsbereichen der radioaktiven Abfälle hat, wird einschließlich der Zufahrtsstrecke mit einem Schotter/Sand-Gemisch verfüllt. Bei einer anzusetzenden Porosität von ca. 30 % ergibt sich für den Infrastrukturbereich ein Fluid zugängliches Volumen von $1,2 \cdot 10^4 \text{ m}^3$.

5.5 Verfüllung und Abdichtung der Schächte

Die Schächte, mit denen das Endlagerbergwerk erschlossen wurde, stellen die anthropogenen Verbindungen zwischen dem Endlager und der Biosphäre dar. Zur Gewährleistung der Isolationswirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) ist es erforderlich, diese anthropogenen Verbindungen durch technische Maßnahmen dauerhaft zu verschließen. Die Abdichtmaßnahmen müssen hinsichtlich der Isolation eine qualitativ vergleichbare Wirkung entwickeln, wie das Wirtsgestein des ewG. Es muss zuverlässig ausgeschlossen werden, dass über die ehemaligen Schachtzugänge Flüssigkeiten in bzw. aus dem Endlager gelangen.

In Abb. 5.4 ist schematisch ein Schachtverschluss dargestellt, wie er in der Schweiz für das Projekt Opalinuston geplant ist. Im Bereich der Schachtabdichtung wird der Schachtausbau vollständig entfernt und Auflockerungen werden beseitigt. Das eigentliche Dichtelement besteht aus einem 40 m hohen kompaktierten Bentonitblock, der hinsichtlich seines Durchmesser deutlich über den ursprünglichen Schachtdurchmesser hinaus geht. Das Dichtelement stützt sich auf eine Schottersäule ab, die bis in den ehemaligen Schachtsumpf reicht. Nach der Wiederaufsättigung mit Wasser erreicht die eingebrachte Abdichtung aus Bentonit qualitative Eigenschaften, die vergleichbar mit dem sie umgebenden Tongestein sind.

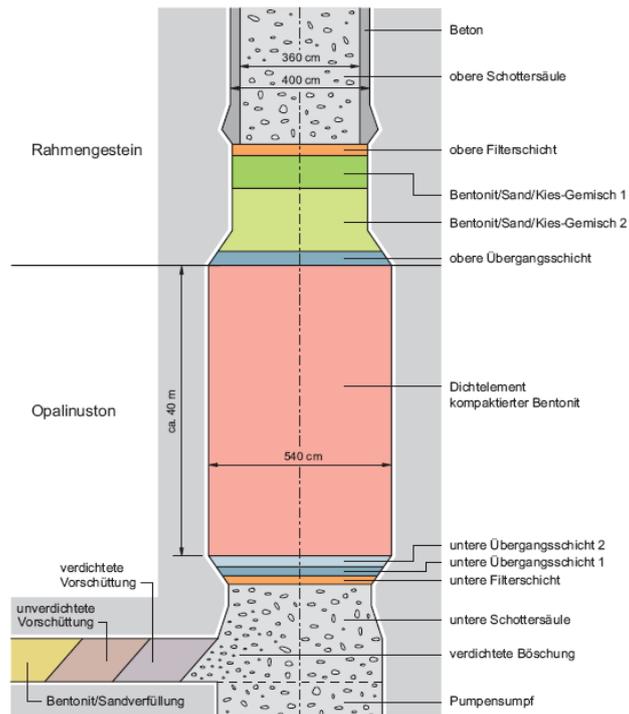


Abb. 5.4 Schematische Darstellung der Versiegelung des unteren Schachtbereichs /NAG 02a/

Eine weitere Abdichtung wird in die Schächte im Bereich unterhalb der Fischerschiefer-Schicht, siehe Abb. 5.5, eingebaut. Die Abdichtung, die analog der Abdichtung in Abbildung 5.4 aufgebaut sein wird, befindet sich in einer Teufe zwischen 250 m und 310 m.

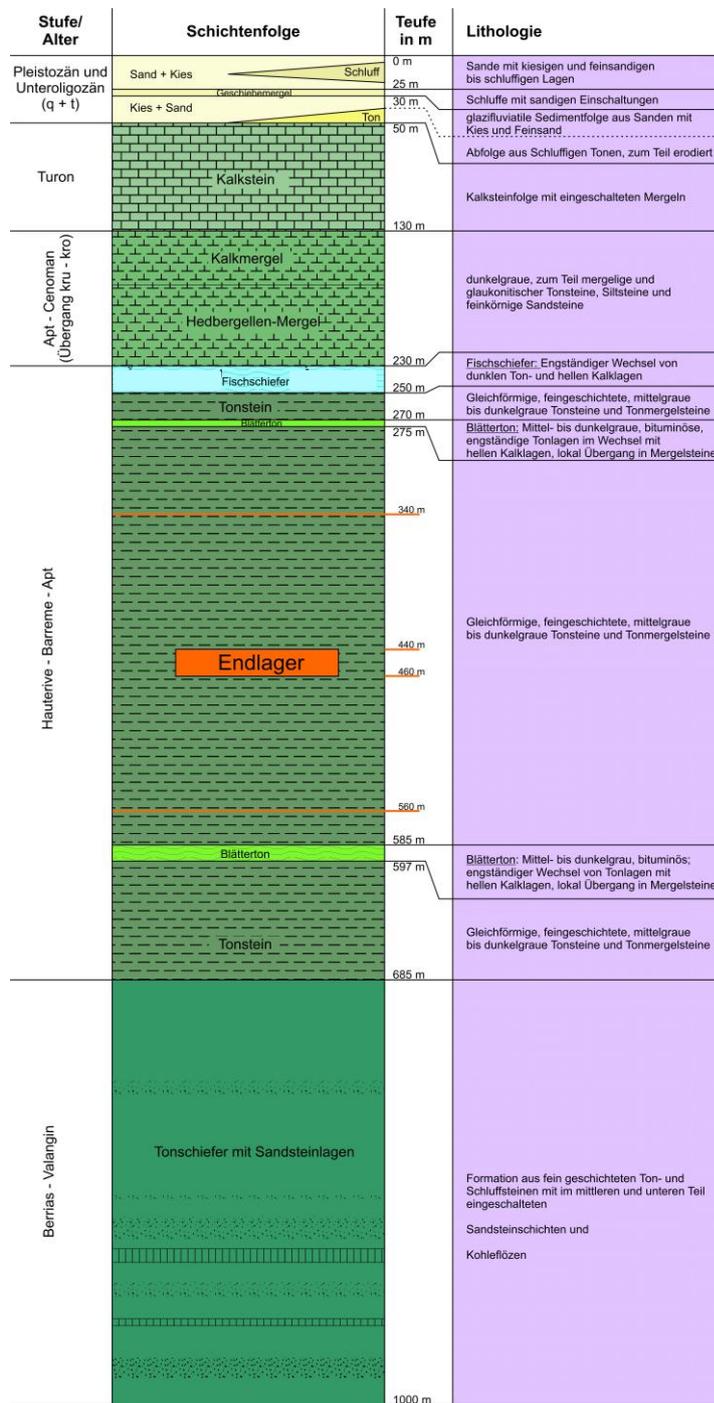


Abb. 5.5 Schichtenfolge des synthetischen Tonsteinstandortes /BFS 07/

In Abbildung 5.6 ist das vollständig verschlossene Endlager zu Beginn der Nachbetriebsphase dargestellt. Die eingezeichneten Verschlüsse der Nebenschächte 1 und 2 verdecken in dieser Darstellung die beiden Abdichtungen der Baustrecke zwischen der

letzten Einlagerungstunnel und der westlichen bzw. östlichen Wetterstrecke, siehe hierzu auch Abbildung 5.4.

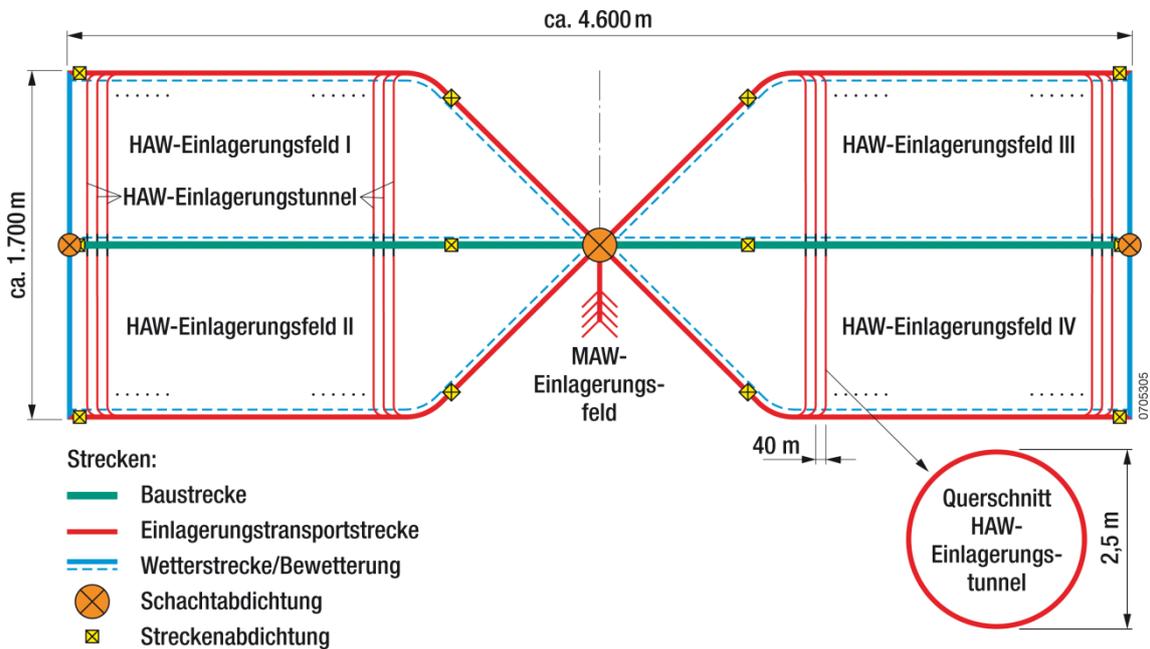


Abb. 5.6 Abdichtbauwerke am Ende der Verschlussphase

(Hinweis: Die Abdichtbauwerke der Baustrecke im Bereich der Nebenschächte 1 und 2 werden in der Darstellung durch die jeweiligen Schachtabdichtungen überlagert)

5.6 Metallmassen im Endlager

Planerisch werden in das Endlager Metallmassen eingebracht und verbleiben dort nach der Schließung des Endlagers. Die im Endlager mit dem Verschluss verbleibenden Metallmassen sind wesentlich für die Gasbildung durch Korrosion und dem mit diesem Prozess ggf. einhergehenden Druckaufbau im Endlager. Zu den relevanten Massen gehören insbesondere die Behälter der Abfallgebinde sowie die Schienen in den Einlagerungstranstrecken. In Bereichen, in denen Abdichtbauwerke errichtet werden wird unterstellt, dass in der Sohle befindliche Schienen vollständig entfernt werden. Für die Abschätzung der Massen wird allerdings unterstellt, dass das ausgeschnittene Schienenmaterial im Endlager verbleibt.

Stahlmassen im HAW-Bereich:

Schienen im HAW-E-tunnel: 850 m · 110 kg/m · 131	~ 1,2·10 ⁴ Mg
Schienen in der E-transportstrecke: 2.700 m · 110 kg/m · 4	~ 1,2·10 ³ Mg
Schienen in der Baustrecke: 4.600 m · 110 kg/m	~ 5,1·10 ² Mg
CSD-V: 8,4 Mg/Beh. · 3.612 Beh.	~ 3,1·10 ⁴ Mg
<u>BE-Behälter: 24 Mg/Beh. · 9.995 Beh.</u>	<u>~ 2,4·10⁵ Mg</u>
Summe:	~ 3,0·10⁵ Mg

Stahlmassen im MAW-Bereich

Schienen in der E-transportstrecke: 300 m · 110 kg/m	~ 3,3·10 ¹ Mg
Schienen in den E-kammern: 90 m · 110 kg/m · 8	~ 7,9·10 ¹ Mg
<u>CSD-C/B: 95 kg/Beh. · 6.052 Beh.</u>	<u>~ 5,8·10² Mg</u>
Summe:	~ 6,0·10² Mg

Für die genannten Positionen führt die Abschätzung letztlich zu einer in das Endlager eingebrachten Stahlmasse in Höhe von etwa 300.000 Mg. Dieser Wert sollte letztendlich auch die Metallmassen abdecken, die durch Metallanker eingebracht werden. Setzt man z.B. die Masse eines Ankers mit 10 kg an und unterstellt, dass pro Meter in einem Einlagerungstunnel 4 Anker gesetzt werden müssen, so ergibt sich für eine Einlagerungstunnellänge von 800 m und 131 Einlagerungstunneln eine Gesamtankermasse von etwa $4,2 \cdot 10^3$ Mg. Die Berücksichtigung dieser Masse hätte aber keinen Einfluss auf die abgeschätzte gesamte Metallmasse von ca. $3,0 \cdot 10^5$ Mg.

Nur schwer abzuschätzen sind die betrieblichen Metallmassen, die am Ende der Betriebsphase des Endlagers nicht freigemessen werden können und als radioaktiver Betriebsabfall im Endlager verbleiben. Diese Metallmassen werden allerdings kaum die Größenordnung der $3,0 \cdot 10^5$ Mg erreichen und darüber hinaus sieht das Betriebskonzept vor, dass diese Betriebsabfälle im Werkstattbereich eingelagert würden.

6 Zusammenfassung

Der Bericht gibt den Zwischenstand bei der Entwicklung eines generischen Endlagerkonzepts für einen synthetischen Tonsteinstandort in Norddeutschland wieder. Das Endlagerkonzept wird im Rahmen des Verbundprojektes VerSi entwickelt. Es wird für die Ableitung einer Methodik zum Vergleich von zwei Endlagerkonzepten für wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall (Zielsetzung des VerSi-Projektes) benötigt. Die Vorgehensweise im VerSi-Projekt baut auf dem Axiom auf, dass der Machbarkeitsnachweis für die zu vergleichenden Endlagerkonzepte umfassend geführt bzw. führbar ist.

Aus den genannten Randbedingungen für das zu entwickelnde Endlagerkonzept resultieren folgende Anforderungen:

- Das Endlagerkonzept muss einen für den Vergleich notwendigen Detaillierungsgrad aufweisen. Der Detaillierungsgrad orientiert sich an der Vorgehensweise, den Vergleich auf die Robustheit und Sicherheitsfunktionen abzustellen.
- An der Machbarkeit bzw. Realisierbarkeit des Endlagers dürfen keine Zweifel bestehen.

Die Kombination der beiden Anforderungen schließt aus, dass relevante Auslegungsmerkmale des Endlagerkonzeptes auf optimistische Annahmen abgestützt werden.

Ein entsprechendes Endlagerkonzept für einen Tonsteinstandort vollständig neu zu entwickeln, erfordert einen erheblichen zeitlichen und technischen Aufwand. Ein solcher Ansatz würde aber auch ignorieren, dass entsprechende Endlagerkonzepte in den letzten zwei Dekaden in der Schweiz sowie in Frankreich entwickelt wurden.

In der Schweiz wurde im Rahmen des Entsorgungsnachweises für bestrahlte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle das "Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers" im Opalinuston entwickelt. Das Konzept baut auf umfassenden F&E-Arbeiten auf, es hat einen hohen Detaillierungsgrad und an seiner grundsätzlichen Machbarkeit bestehen keine Zweifel.

In Frankreich wurde die Machbarkeit der geologischen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einer Tonformation im Rahmen einer Machbarkeitsstudie nachgewiesen. Diese Studie wurde einem nationalen und internationalen Review unterzogen. Im Er-

gebnis bestehen keine Zweifel an den grundsätzlichen Aussagen der Machbarkeitsstudie.

Vor diesem Hintergrund drängte es sich auf, für die Ableitung eines generischen Endlagerkonzeptes im Tonstein von vornherein die wissenschaftlichen Arbeiten aus dem Ausland zu berücksichtigen. Im Fokus stand dabei das Endlagerkonzept der Schweiz, da in der Schweiz im Hinblick auf die endzulagernden Abfälle (verglaste Abfälle und technologische Rückstände aus der Wiederaufarbeitung und bestrahlte Brennelemente) zu Deutschland vergleichbare Randbedingungen vorliegen.

Auf Basis der bestehenden Untersuchungen und Nachweise wurde ein umfassender Entwurf für ein Endlagerkonzept abgeleitet, das den für Deutschland prognostizierten Abfallmengen und Arten sowie den synthetisierten Standortbedingungen in Norddeutschland Rechnung trägt. Dieses Konzept wurde durch Modifikation des von der NAGRA für das Opalinuston-Projekt in der Schweiz entwickelten Endlagerkonzepts entwickelt. Aufgrund der gegenüber der Schweiz höheren Abfallmengen war insbesondere der geometrische Aufbau des Endlagers neu zu entwickeln. Die Begrenzung des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein erforderte für das deutsche Endlagerkonzept im Tonstein im Vergleich zum Schweizer Behälterkonzept eine Modifikation der Behälterkapazitäten. Im Vergleich zum Endlagerkonzept der Schweiz wurde für das Endlagerkonzept in Norddeutschland auf ein Pilot- und Testlager (Felslabor) verzichtet.

7 Literatur/Unterlagen

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd, Dezember 2002
- /AND 05/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) :
Dossier 2005 Argile
Les recherches de l' Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs a haute activité et á vie longue
Décembre 2005
- /ATG 06/ Gesetz über die friedliche Verwendung von Atomenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz):
Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 2985 (BGBl. I. S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 161 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I. S. 2407)
- /BFS 03/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Modellinventar radioaktiver/nicht radioaktiver Abfallinhaltsstoffe in einem zukünftigen Endlager
Fachbereich: Sicherheit nuklearer Entsorgung, Stand: Dezember 2003
- /BFS 06/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Abfallmengen / Prognosen
Bestand an wärmeentwickelnden Abfällen im Jahr 2040
http://www.bfs.de/de/transport/endlager/abfall_prognosen.html,
Stand:18.02.2008
- /BFS 07/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes
Salzgitter, September 2007
- /BFS 09/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Persönliche Mitteilung, email vom 23.03.2009

- /BGR 06/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):
Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland, Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteininformationen
Hannover/ Berlin, August 2006
- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):
Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen
Berlin/Hannover, April 2007
- /BMI 83/ Bundesministerium des Inneren (BMI):
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk; Bundesministerium des Inneren; Bundesanzeiger 35 (1983) Nr.2, S. 45/46
- /BMU 03/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Projektgruppe Nationaler Entsorgungsplan, RS III 2-13200/1, Arbeitsgruppe Nationaler Entsorgungsplan für radioaktive Reststoffe, November 2003
- /BMU 09/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle
Bonn, 18. März 2009,
- /COG 91/ COGEMA:
Specifications for bituminous waste produced in STE3 B
Second Series, February 1991
- /COL 09/ AF-Colenco AG:
email vom 20.08.2009, Übersendung des Aktivitätsinventars für eine CSD-C
- /DBE 94/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern Technology (DBE_{TEC}) mbH:
Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Simulation des Schachttransportes, Abschlussbericht und Anlagen, Peine, März 1994

- /DBE 95/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern Technology (DBE_{TEC}) mbH:
Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8201), Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht, Hauptband, Peine, Oktober 1995, DEAB T 59
- /DBE 08/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern Technology (DBE_{TEC}) mbH:
Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, - TEC -20-2008—AP, F&E-Vorhabens ISIBEL (FKZ 02 E 10055), Peine April 2008
- /FZK 05/ Forschungszentrum Karlsruhe (FZK):
“Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW“
Schreiben PH-YG/se/05/2575 vom 13. Dezember 2005
- /GNS 06/ Gesellschaft für Nuklearservice (GNS) mbH:
Darstellung der getroffenen Entsorgungsmaßnahmen, GNS008/2006
Revision 0, 20.03.2006
- /GRS 07a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Entsorgung abgebrannter Brennelemente aus den Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland
Ergebnisse der Länderumfrage zum Stichtag 31.12.2006
Arbeitsbericht, Stand: August 2007
- /GRS 07b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen
GRS-A-3358, Januar 2007
- /GRS 08/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Abbrandrechnungen mit OREST Version 2006 im Zusammenhang mit dem Vorhaben VerSi, GRS, Juni 2008

- /GRS 10a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
 Autoren: Beuth, T.; Bracke, G.
 Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien - Abschlussbericht
 Vorhaben VerSi- 3607R02580 „Szenariientwicklung“, Köln, Februar 2010
- /GRS 10b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
 Autoren: Larue, P. J.; Kock, I.; Seher, H.; Peiffer, F.
 Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonstein-
 standortes, - Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einem Ton-
 steinstandort, Teil 2: Standortcharakterisierung, Teil 3: Endlagerkonzept im
 Tonstein, Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz -
 Abschlussberichte zum Vorhaben 3607R02538 „planerische Grundsatzfra-
 gen“, GRS-A-3535, Köln, Dezember 2010
- /GRS 10c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
 Autoren: Fischer-Appelt, K.; Baltus B.
 Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unter-
 schiedlichen Wirtsgesteinsformationen Anleitung zur Anwendung der Ab-
 wägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben SR 2589 VerSi „Evalu-
 ierung der Vorgehensweise“, Köln, Dezember 2010
- /GRS 10d/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
 Autoren: André Rübel, Jörg Mönig
 Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein
 Endlager im Salz, WS2044, GRS-A-3521, Braunschweig, Oktober 2010
- /ISI 07/ Projekt ISIBEL:
 Abschlussbericht für das Vorhaben Überprüfung und Bewertung des In-
 strumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für
 HAW“, ISIBEL, AP1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung
 DBE_{Tec}, Juni 2007
- /KSA 05/ Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) :
 Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemen-
 te, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, (Projekt
 Opalinuston), KSA 23/70, August 2005

- /NAG 02a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Technischer Bericht 02-02
Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle
Dezember 2002
- /NAG 02b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Technical Report 01-04
Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay
October 2002
- /NAG 03/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Projekt Entsorgungsnachweis, Summary of the Safety Case, 1st AMIGO Workshop, Yverdon-les-Bains, Switzerland, 3. – 5. Juni 2003

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Wärmeleistung von bestrahltem Kernbrennstoff in Abhängigkeit von der Abklingzeit	14
Abb. 2.2	Wärmeleistung verschiedener Brennelemente in Abhängigkeit von der Abklingzeit	15
Abb. 2.3	Schematische Darstellung und Foto einer CSD-V /AND 05/	19
Abb. 2.4	Endlagerbehälter für bestrahlte Brennelemente und HAW-Kokillen entsprechend /NAG 02a/	24
Abb. 2.5	Endlagerbehälter (Stahl) für bestrahlte Brennelemente	25
Abb. 2.6	Endlagerbehälter für CSD-B bzw. CSD-C entsprechend /NAG 02a/	27
Abb. 3.1	Skizze des Endlagerkonzeptes	29
Abb. 3.2	Schematische Darstellung des MAW-Endlagerbereichs	35
Abb. 3.3	Schematische Darstellung (vertikaler Schnitt) der Einbettung der hochradioaktiven Abfälle in das Wirtsgestein /NAG 02b/	39
Abb. 4.1	Verfahrensablauf zur Endlagerung von HAW-Abfallgebinden im Bereich der Schleuse vor dem Einlagerungstunnel /NAG 02a/	43
Abb. 4.2	Schematische Darstellung der Einlagerung von HAW-Abfallgebinden	43
Abb. 4.3	Schematische Darstellung des Versetzens der jeweils eingelagerten HAW-Abfallgebinde	44
Abb. 4.4	Skizze des MAW-Einlagerungsbereichs	45
Abb. 4.5	Schematische Darstellung der Einlagerung von MAW-Abfallgebinden /AND 05/	46
Abb. 5.1	Schematische Darstellung der Versiegelung einer HAW-Einlagerungsstrecke /NAG 02a/	49
Abb. 5.2	Zustand des MAW-Einlagerungsbereichs am Ende der Einlagerungsbetriebsphase	50
Abb. 5.3	Abdichtbauwerke an Schlüsselpositionen des generischen Endlagerkonzeptes	52
Abb. 5.4	Schematische Darstellung der Versiegelung des unteren Schachtbereichs /NAG 02a/	54
Abb. 5.5	Schichtenfolge des synthetischen Tonsteinstandortes /BFS 07/	55
Abb. 5.6	Abdichtbauwerke am Ende der Verschlussphase	56

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Prognose der Abfallgebinderolumen für wärmeentwickelnde Abfälle für das Jahr 2040 /BFS 06/	10
Tab. 2.2	Prognostizierte Stückzahlen für wärmeentwickelnde Abfälle /GRS 07a/	11
Tab. 2.3	Masse an Schwermetall (SM) der zukünftig direkt endzulagernden bestrahlten Brennelemente /GRS 07a/	11
Tab. 2.4	Parameter für die OREST-Rechnungen zur Bestimmung der Nachzerfallswärmeleistung verschiedenen Brennelemente /GRS 08/	13
Tab. 2.5	Wärmeleistung für bestrahlten Kernbrennstoff in Abhängigkeit von der Abklingzeit /GRS 08/	14
Tab. 2.6	Wärmeleistung für verschiedene bestrahlte Brennelemente in Abhängigkeit von der Abklingzeit /GRS 08/	15
Tab. 2.7	Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar für LWR-Brennelemente mit UO_2 sowie MOX-Brennstoff	17
Tab 2.8	Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer CSD-V /BFS 03/	20
Tab 2.9	Wärmeleistung einer CSD-V in Abhängigkeit von der Entnahme des Brennstoffs aus dem Reaktor	20
Tab. 2.10	Maximales nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer CSD-C /COL 09/	21
Tab. 2.11	Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer CSD-B /BFS 03/	22
Tab. 2.12	Anzahl der endzulagernden Abfallgebinder mit wärmeentwickelndem Abfall	26
Tab. 2.13	Vergleich endzulagernder wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland und der Schweiz	28
Tab. 3.1	Ermittlung der notwendigen Einlagerungstunnel für HAW-Abfallgebinder	31
Tab. 3.2	Thermische Eigenschaften von Stahl, Bentonite und Tonstein	39

Abkürzungsverzeichnis

AtG	Atomgesetz
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandort
ANDRA	Agence Nationale por la gestion des Dechets Radioactifs
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (Kugelhaufenreaktor Jülich)
BE	Brennelement
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMI	Bundesministerium des Inneren
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CSD-B	Kokillen mit verglasten technologischen Abfällen aus der WA (MAW)
CSD-C	Kokillen mit kompaktierten Hülsen und Endkappen aus der WA (MAW)
CSD-V	Kokillen mit verglasten Prozessabfällen aus der WA (HAW)
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
DIN	Deutsche Industrienorm
DWR	Druckwasserreaktor
EDZ	Excavation Damaged Zone (Auflockerungszone)
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GNS	Gesellschaft für Nuklearservice
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
HAW	Hochradioaktiver Abfall
KSA	Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen
LAW	Leichtradioaktiver Abfall
LWR	Leichtwasserreaktor
MAW	Mittelradioaktiver Abfall
MOX	Mischoxid (BE)
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
OPA	Opalinuston
RSK	Reaktorsicherheitskommission
SWR	Siedewasserreaktor
THTR	Thorium Hochtemperatur Reaktor (Hamm Uentrop)
tSM / MgSM	Tonne Schwermetall
WA	Wiederaufarbeitung

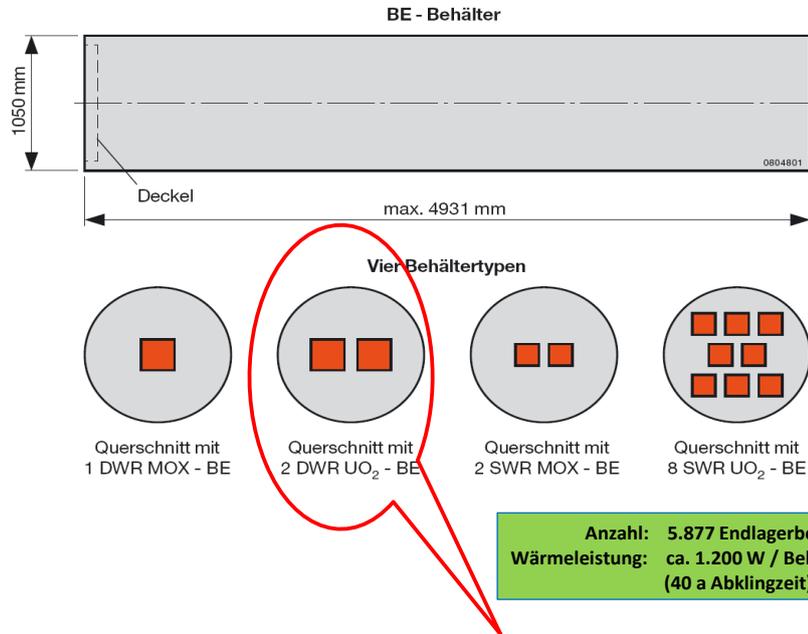
Anhang A: Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar und stoffspezifisches Inventar in Endlagerbehältern

Hinweise:

Die BE- und CSD-V spezifischen Daten wurden mittels Abbrandrechnungen - Orest Code, Vers. 06 - berechnet /GRS 08/. Das CI-36 Inventar - Aktivierungsprodukt von Verunreinigungen in bestrahlten Brennelementen – wurde nur für SWR UO₂-BE in den Modellrechnungen erfasst. Für die anderen BE wurde das Radionuklid übertragen. Das Aktivitätsinventar für CSD-C wurde von AF-Colenco AG zur Verfügung gestellt /COL 09/. Die hier für die Endlagerbehälter angegebenen Daten basieren auf maximalen Aktivitätsinventaren, die für CSD-C in der Schweiz angegeben werden. Die Aktivitätsinventare für die verglasten Betriebsabfälle in den CSD-B wurden aus /BFS 03/ entnommen.

Gegenüber den vorläufigen Versionen des Berichts wurden die Tabellenwerte im Anhang im Dezember 2010 geändert. Die in den Tabellen ursprünglich angegebenen Werte bezogen sich auf eine tSM. Die ursprünglichen Werte wurden den Analysen im Vorhaben WS 2044 zu Grunde gelegt.

A1: BE-Behälter mit zwei DWR UO₂-Brennelementen



Radionuklidinventar BE-Behälter mit 2 DWR UO₂ BE							
(OREST-Abbrandrechnung 40 a nach Entladung)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	3,933E+12	Pr-144	2,091E+01	Rn-219	2,576E+09	Pu-240	2,589E+13
Be-10	1,359E+07	PR-144m	2,929E-01	Rn-220	2,576E+09	Pu-241	1,089E+15
C-14	1,780E+10	Pm-146	1,553E+08	Rn-222	1,562E+05	Pu-242	1,555E+11
Cl-36	3,294E+09	Pm-147	1,949E+11	Fr-221	3,069E+04	Am-241	2,114E+14
Co-60	7,152E-07	Sm-146	2,050E+04	Fr-223	1,591E+04	Am-242m	3,492E+11
Ni-63	3,472E+02	Sm-147	2,792E+05	Ra-223	1,138E+06	Am-242	3,479E+11
Se-79	1,213E+09	Sm-151	1,396E+13	Ra-224	2,576E+09	Am-243	1,946E+12
Sr-90	1,721E+15	Eu-152	8,051E+09	Ra-225	3,069E+04	Cm-242	2,877E+11
Y 90	1,722E+15	Eu-154	1,713E+13	Ra-226	1,562E+05	Cm-243	7,077E+11
Zr-93	1,097E+11	Eu-155	8,433E+11	Ac-225	3,069E+04	Cm-244	7,634E+13
Nb-93m	9,167E+10	Ho-166m	8,081E+07	Ac-227	1,137E+06	Cm-245	4,399E+10
Nb-94	2,245E+07	Tl-207	1,135E+06	Th-227	1,122E+06	Cm-246	1,067E+10
Tc-99	8,344E+11	Tl-208	9,249E+08	Th-228	2,575E+09	Summe	1,035E+16
Ru-106	4,903E+04	Tl-209	6,446E+02	Th-229	3,069E+04		
Rh-106	4,903E+04	Tl-210	3,749E+01	Th-230	1,832E+07		
Pd-107	7,656E+09	Pb-209	3,069E+04	Th-231	5,457E+08		
Ag-108	1,002E+05	Pb-210	5,539E+04	Th-234	1,187E+10		
Aq-108m	1,151E+06	Pb-211	1,138E+06	Pa-231	1,747E+06		
Aq-109m	5,532E-01	Pb-212	2,576E+09	Pa-233	2,506E+10		
Cd-109	5,532E-01	Pb-214	1,562E+05	Pa-234m	1,187E+10		
Cd-113m	2,760E+09	Bi-210	5,541E+04	Pa-234	1,542E+07		
Sn-121	4,130E+11	Bi-211	1,138E+06	U-232	2,505E+09		
Sn-121m	5,322E+11	Bi-212	2,576E+09	U-233	5,169E+06		
Sn-126	3,426E+10	Bi-213	3,069E+04	U-234	5,947E+10		
Sb-125	1,923E+10	Bi-214	1,562E+05	U-235	5,456E+08		
Sb-126	4,796E+09	Po-210	5,541E+04	U-236	1,412E+10		
Sb-126m	3,426E+10	Po-211	3,414E+03	U-237	2,618E+10		
Te-125m	4,697E+09	Po-212	1,652E+09	U-238	1,186E+10		
I-129	1,715E+09	Po-213	3,005E+04	Np-237	2,505E+10		
Cs-134	2,165E+10	Po-214	1,562E+05	Np-238	1,571E+09		
Cs-135	2,555E+10	Po-215	1,138E+06	Np-239	1,946E+12		
Cs-137	2,668E+15	Po-216	2,576E+09	Pu-236	4,477E+06		
Ba-137m	2,518E+15	Po-218	1,562E+05	Pu-238	2,105E+14		
Ce-144	2,091E+01	At-217	3,069E+04	Pu-239	1,482E+13		

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO ₂ -Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
H 1	1,11E-02										
H 2	4,64E-03										
HE 3	1,02E-03	4,57E-02	7,13E-02	8,58E-02	9,41E-02	9,88E-02	1,02E-01	1,04E-01	1,05E-01	1,05E-01	1,05E-01
HE 4	8,71E+00	1,06E+01	1,19E+01	1,32E+01	1,44E+01	1,55E+01	1,65E+01	1,84E+01	2,02E+01	2,19E+01	2,34E+01
LI 6	1,41E-02										
LI 7	1,72E-03										
BE 9	1,35E-03										
B 10	1,87E-11	8,89E-10	1,76E-09	2,63E-09	3,50E-09	4,37E-09	5,24E-09	6,98E-09	8,72E-09	1,05E-08	1,22E-08
B 11	1,33E-06										
C 12	2,90E-04										
C 13	1,84E+01										
N 14	2,88E-03	3,00E-03	3,13E-03	3,25E-03	3,38E-03	3,50E-03	3,63E-03	3,87E-03	4,12E-03	4,37E-03	4,61E-03
N 15	1,99E-04										
O 16	1,40E+05										
O 17	5,68E+01										
O 18	3,21E+02										
F 19	2,24E-04										
NE 20	7,11E-09										
NE 21	6,79E-03										
NE 22	1,24E-16										
FE 58	9,35E-22										
CO 59	2,56E-18	3,24E-18									
NI 60	2,77E-19	2,66E-18	3,30E-18	3,48E-18	3,52E-18	3,53E-18	3,54E-18	3,54E-18	3,54E-18	3,54E-18	3,54E-18
NI 61	1,17E-16										
NI 62	9,48E-12										
NI 63	2,18E-10	2,04E-10	1,90E-10	1,77E-10	1,65E-10	1,54E-10	1,44E-10	1,25E-10	1,09E-10	9,51E-11	8,28E-11
CU 63	1,63E-12	1,62E-11	2,98E-11	4,26E-11	5,44E-11	6,55E-11	7,58E-11	9,44E-11	1,11E-10	1,25E-10	1,37E-10
CU 65	2,45E-10	2,83E-10									
ZN 64	3,07E-15	3,08E-15									

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
ZN 66	6,03E-05	6,05E-05									
ZN 67	2,92E-04	2,94E-04									
ZN 68	4,93E-04										
ZN 70	2,15E-03										
GA 69	1,31E-04										
GA 71	4,05E-03										
GE 70	2,21E-06										
GE 72	1,15E-02										
GE 73	2,69E-02										
GE 74	7,85E-02										
GE 76	5,21E-01										
AS 75	1,91E-01										
SE 74	9,59E-08	1,00E-07									
SE 76	9,19E-03	9,22E-03									
SE 77	1,26E+00										
SE 78	3,79E+00										
SE 80	2,12E+01										
SE 82	5,61E+01										
BR 79	2,40E-05	7,42E-05	1,24E-04	1,75E-04	2,25E-04	2,75E-04	3,25E-04	4,25E-04	5,26E-04	6,26E-04	7,26E-04
BR 81	3,50E+01										
KR 80	1,02E-04										
KR 82	1,56E+00	1,57E+00									
KR 83	6,09E+01										
KR 84	2,02E+02										
KR 86	3,03E+02										
RB 85	1,64E+02	1,83E+02	1,93E+02	1,98E+02	2,01E+02	2,02E+02	2,03E+02	2,04E+02	2,04E+02	2,04E+02	2,04E+02
RB 87	4,10E+02										
SR 84	2,90E-05	3,16E-05									
SR 86	9,78E-01	1,03E+00									
SR 87	5,49E-03										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
SR 88	5,64E+02										
Y 89	7,21E+02	7,53E+02									
ZR 90	4,89E+01	2,41E+02	3,92E+02	5,10E+02	6,02E+02	6,74E+02	7,30E+02	8,08E+02	8,56E+02	8,85E+02	9,03E+02
ZR 91	9,40E+02	9,93E+02									
ZR 92	1,08E+03										
ZR 94	1,31E+03										
ZR 96	1,37E+03										
NB 93	9,33E-05	1,46E-03	4,21E-03	7,87E-03	1,21E-02	1,67E-02	2,16E-02	3,18E-02	4,23E-02	5,29E-02	6,35E-02
MO 94	1,26E-03	1,27E-03	1,27E-03	1,27E-03							
MO 95	1,12E+03	1,25E+03									
MO 96	1,01E+02										
MO 97	1,38E+03										
MO 98	1,42E+03										
MO100	1,62E+03										
RU 98	1,48E-04	1,48E-04	1,48E-04	1,48E-04	1,48E-04	1,48E-04	1,49E-04	1,49E-04	1,49E-04	1,49E-04	1,49E-04
RU 99	8,20E-03	5,15E-02	9,47E-02	1,38E-01	1,81E-01	2,25E-01	2,68E-01	3,54E-01	4,41E-01	5,27E-01	6,14E-01
RU100	2,50E+02										
RU101	1,32E+03										
RU102	1,42E+03										
RU104	1,02E+03										
RH103	6,68E+02	7,35E+02									
PD102	8,01E-04	1,30E-03									
PD104	4,65E+02										
PD105	7,08E+02	7,10E+02									
PD106	4,21E+02	6,84E+02	6,85E+02								
PD108	2,80E+02										
PD110	8,93E+01										
AG107	5,87E-05	4,88E-04	9,17E-04	1,35E-03	1,78E-03	2,20E-03	2,63E-03	3,49E-03	4,35E-03	5,21E-03	6,07E-03
AG108	1,28E-08	4,34E-15	4,11E-15	3,89E-15	3,69E-15	3,49E-15	3,31E-15	2,96E-15	2,66E-15	2,38E-15	2,14E-15
CD106	5,28E-12										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
CD108	2,24E-03										
CD110	8,33E+01	8,52E+01									
CD111	4,18E+01	4,24E+01									
CD112	2,08E+01										
CD113	1,28E-01	1,33E-01									
CD114	2,30E+01										
CD116	8,13E+00										
IN113	2,94E-04	1,21E-03	1,78E-03	2,12E-03	2,33E-03	2,46E-03	2,54E-03	2,62E-03	2,65E-03	2,66E-03	2,66E-03
IN115	2,19E+00	2,24E+00									
SN114	4,97E-05	5,47E-05									
SN115	3,49E-01	3,50E-01									
SN116	5,20E+00										
SN117	7,34E+00										
SN118	6,30E+00										
SN119	6,42E+00	6,43E+00									
SN120	6,34E+00										
SN122	8,34E+00										
SN124	1,39E+01										
SB121	5,97E+00	6,04E+00	6,08E+00	6,12E+00	6,16E+00	6,19E+00	6,22E+00	6,26E+00	6,30E+00	6,33E+00	6,35E+00
SB123	7,63E+00	7,89E+00									
TE122	6,56E-01	6,61E-01									
TE123	6,23E-03	8,18E-03									
TE124	5,14E-01	6,05E-01									
TE125	5,95E+00	1,78E+01	1,87E+01	1,88E+01							
TE126	1,06E+00	1,07E+00	1,07E+00	1,07E+00	1,07E+00	1,08E+00	1,08E+00	1,08E+00	1,09E+00	1,09E+00	1,10E+00
TE128	1,51E+02										
TE130	6,49E+02										
I 127	7,87E+01	8,14E+01									
XE126	3,41E-04	3,53E-04									
XE128	7,18E+00										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
XE129	5,89E-02	6,15E-02	6,16E-02	6,17E-02	6,19E-02	6,20E-02	6,21E-02	6,23E-02	6,26E-02	6,28E-02	6,30E-02
XE130	1,66E+01										
XE131	6,14E+02	6,25E+02									
XE132	2,01E+03	2,02E+03									
XE134	2,63E+03										
XE136	4,05E+03										
CS133	1,80E+03	1,82E+03									
BA130	3,15E-12										
BA134	1,41E+02	4,40E+02	4,51E+02								
BA135	1,48E+00	1,49E+00	1,49E+00	1,50E+00	1,50E+00	1,50E+00	1,50E+00	1,50E+00	1,51E+00	1,51E+00	1,52E+00
BA136	5,77E+01	5,92E+01									
BA137	9,43E+01	5,25E+02	8,66E+02	1,14E+03	1,35E+03	1,52E+03	1,66E+03	1,85E+03	1,97E+03	2,05E+03	2,10E+03
BA138	2,24E+03										
LA138	6,51E-02										
LA139	2,09E+03										
CE136	1,41E-11										
CE138	3,84E-03										
CE140	2,07E+03	2,10E+03									
CE142	1,93E+03										
PR141	1,83E+03	1,90E+03									
ND142	4,90E+01	4,91E+01									
ND143	1,18E+03	1,21E+03									
ND144	1,93E+03	2,40E+03									
ND145	1,08E+03										
ND146	1,26E+03										
ND148	6,39E+02										
ND150	3,10E+02										
SM144	3,64E-10										
SM147	1,10E+02	3,13E+02	3,28E+02	3,29E+02							
SM148	2,63E+02	2,67E+02									

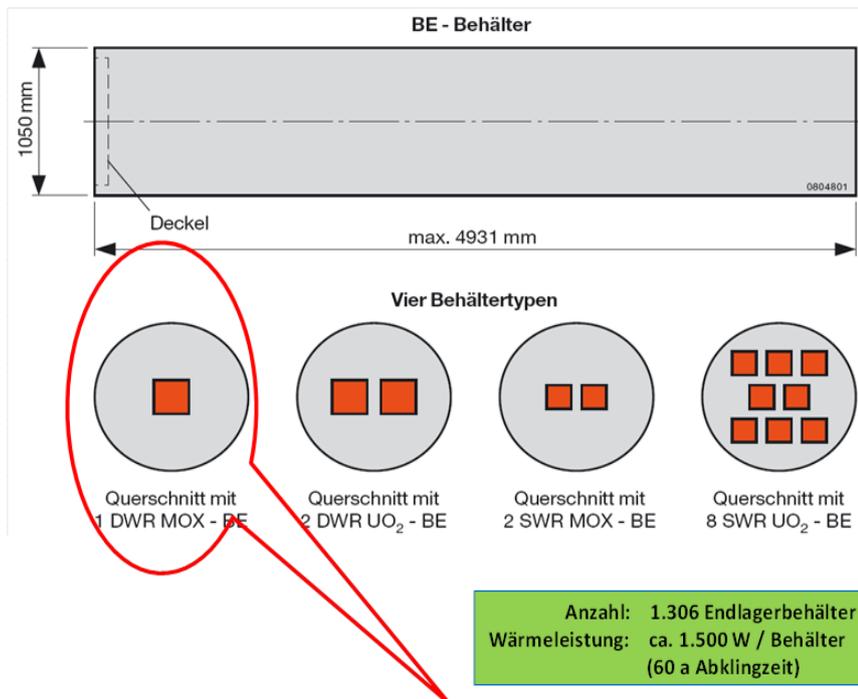
Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
SM149	2,81E+00	4,91E+00									
SM150	5,00E+02										
SM152	1,93E+02										
SM154	6,53E+01										
EU151	1,70E-02	1,46E+00	2,80E+00	4,04E+00	5,19E+00	6,25E+00	7,23E+00	8,99E+00	1,05E+01	1,18E+01	1,29E+01
EU153	2,14E+02	2,15E+02									
GD152	5,42E-02	5,54E-02	5,61E-02	5,65E-02	5,67E-02	5,68E-02	5,69E-02	5,70E-02	5,70E-02	5,70E-02	5,70E-02
GD154	4,35E+00	2,82E+01	3,89E+01	4,36E+01	4,57E+01	4,67E+01	4,71E+01	4,74E+01	4,74E+01	4,75E+01	4,75E+01
GD155	1,10E-01	1,34E+01	1,65E+01	1,71E+01	1,73E+01						
GD156	1,96E+02	2,06E+02									
GD157	1,97E-01	2,40E-01									
GD158	4,24E+01										
GD160	1,98E+00										
TB159	4,64E+00	4,65E+00									
DY156	1,85E-14										
DY158	2,06E-06	2,96E-06	3,81E-06	4,63E-06	5,42E-06	6,16E-06	6,87E-06	8,20E-06	9,42E-06	1,05E-05	1,15E-05
DY160	4,28E-01	6,16E-01									
DY161	6,35E-01	6,53E-01									
DY162	4,62E-01										
DY163	4,10E-01										
DY164	1,02E-01										
HO165	1,75E-01										
ER162	5,61E-15										
ER164	1,52E-06										
ER166	5,35E-02	5,39E-02									
ER167	1,90E-03										
ER168	7,01E-03										
ER170	3,69E-04										
TM169	4,57E-04	4,76E-04									
YB168	8,58E-13										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 DWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
YB170	2,75E-04	3,94E-04									
YB171	9,73E-05	2,09E-04	2,12E-04								
YB172	3,71E-04	3,74E-04									
YB173	6,12E-06										
YB174	9,37E-07										
YB176	4,93E-12	4,94E-12									
LU175	3,75E-08	3,85E-08									
LU176	1,21E-10										
HF174	1,51E-17										
HF176	4,73E-09										
HF177	4,17E-10	4,40E-10									
HF178	3,87E-10										
HF179	3,41E-11										
HF180	2,77E-12										
TA181	1,37E-14	2,24E-14									
W 182	7,53E-17	2,08E-16									
W 183	8,31E-16	8,98E-16									
W 184	3,16E-17										
RE185	2,53E-20	6,71E-20									
TL205	0,00E+00	1,11E-21	2,22E-21	3,33E-21	4,44E-21	5,55E-21	6,66E-21	8,88E-21	1,11E-20	1,33E-20	1,55E-20
PB204	8,49E-19										
PB205	2,44E-15										
PB206	1,43E-10	1,91E-09	3,67E-09	6,24E-09	1,08E-08	1,86E-08	3,17E-08	8,13E-08	1,79E-07	3,47E-07	6,11E-07
PB208	2,66E-06	1,97E-04	5,30E-04	8,54E-04	1,15E-03	1,42E-03	1,66E-03	2,08E-03	2,42E-03	2,70E-03	2,93E-03
PB209	3,40E-13	1,25E-13	1,38E-13	1,56E-13	1,80E-13	2,09E-13	2,44E-13	3,32E-13	4,45E-13	5,84E-13	7,50E-13
BI209	5,46E-10	2,84E-09	5,28E-09	8,02E-09	1,11E-08	1,48E-08	1,90E-08	2,97E-08	4,41E-08	6,32E-08	8,80E-08
TH232	4,18E-04	2,13E-03	3,84E-03	5,56E-03	7,27E-03	8,99E-03	1,07E-02	1,41E-02	1,76E-02	2,10E-02	2,45E-02

A2: BE-Behälter mit einem DWR MOX-Brennelement



Radionuklidinventar BE-Behälter mit 1 DWR MOX BE							
(OREST-Abbrandrechnung 60 a nach Entladung)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	7,207E+11	Ce-144	1,938E-07	At-217	8,934E+03	Pu-239	2,590E+13
Be-10	7,514E+06	Pr-144	0,000E+00	Rn-219	2,486E+05	Pu-240	8,440E+13
C-14	8,720E+09	PR-144m	0,000E+00	Rn-220	4,347E+08	Pu-241	1,178E+15
Cl-36	1,647E+09	Pm-146	2,733E+07	Rn-222	2,983E+05	Pu-242	5,392E+11
Co-60	6,230E-08	Pm-147	5,923E+08	Fr-221	8,934E+03	Am-241	6,791E+14
Ni-63	2,583E+02	Sm-146	1,422E+04	Fr-223	3,476E+03	Am-242m	3,994E+12
Se-79	5,528E+08	Sm-147	1,635E+05	Ra-223	2,486E+05	Am-242	3,978E+12
Sr-90	3,009E+14	Sm-151	1,832E+13	Ra-224	4,347E+08	Am-243	7,670E+12
Y 90	3,010E+14	Eu-152	1,632E+10	Ra-225	8,934E+03	Cm-242	3,290E+12
Zr-93	4,239E+10	Eu-154	3,870E+12	Ra-226	2,982E+05	Cm-243	2,577E+12
Nb-93m	3,942E+10	Eu-155	3,596E+10	Ac-225	8,934E+03	Cm-244	2,208E+14
Nb-94	1,629E+07	Ho-166m	5,268E+07	Ac-227	2,482E+05	Cm-245	5,949E+11
Mo-93	1,912E-09	Tl-207	2,479E+05	Th-227	2,451E+05	Cm-246	9,152E+10
Tc-99	4,540E+11	Tl-208	1,561E+08	Th-228	4,346E+08	Summe	5,051E+15
Ru-106	5,304E-02	Tl-209	1,876E+02	Th-229	8,934E+03		
Rh-106	5,304E-02	Tl-210	7,160E+01	Th-230	3,103E+07		
Pd-107	8,637E+09	Pb-209	8,934E+03	Th-231	1,210E+08		
Ag-108	8,772E+04	Pb-210	1,074E+05	Th-234	5,632E+09		
Ag-108m	1,008E+06	Pb-211	2,486E+05	Pa-231	3,437E+05		
Ag-109m	0,000E+00	Pb-212	4,347E+08	Pa-233	1,350E+10		
Cd-109	2,499E-05	Pb-214	2,983E+05	Pa-234m	5,632E+09		
Cd-113m	2,824E+09	Bi-210	1,075E+05	Pa-234	7,322E+06		
Sn-121	2,562E+11	Bi-211	2,486E+05	U-232	4,227E+08		
Sn-121m	3,301E+11	Bi-212	4,347E+08	U-233	2,285E+06		
Sn-126	2,640E+10	Bi-213	8,934E+03	U-234	9,688E+10		
Sb-125	8,559E+07	Bi-214	2,983E+05	U-235	1,210E+08		
Sb-126	3,696E+09	Po-210	1,075E+05	U-236	1,107E+09		
Sb-126m	2,641E+10	Po-211	7,457E+02	U-237	2,831E+10		
Te-125m	2,090E+07	Po-212	2,787E+08	U-238	5,632E+09		
I-129	1,258E+09	Po-213	8,746E+03	Np-237	1,350E+10		
Cs-134	1,297E+07	Po-214	2,982E+05	Np-238	1,798E+10		
Cs-135	3,124E+10	Po-215	2,486E+05	Np-239	7,670E+12		
Cs-137	9,209E+14	Po-216	4,347E+08	Pu-236	1,806E+04		
Ba-137m	8,694E+14	Po-218	2,983E+05	Pu-238	4,117E+14		

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
H 1	6,552E-03										
H 2	2,494E-03										
HE 3	1,643E-03	2,686E-02	4,124E-02	4,943E-02	5,408E-02	5,678E-02	5,829E-02	5,964E-02	6,011E-02	6,022E-02	6,027E-02
HE 4	1,302E+01	2,088E+01	2,585E+01	3,017E+01	3,398E+01	3,740E+01	4,054E+01	4,616E+01	5,117E+01	5,574E+01	6,001E+01
LI 6	1,327E-02										
LI 7	9,636E-04										
BE 9	8,596E-04										
B 10	3,739E-11	7,582E-10	1,479E-09	2,200E-09	2,920E-09	3,641E-09	4,362E-09	5,803E-09	7,244E-09	8,684E-09	1,013E-08
B 11	1,055E-06										
C 12	2,418E-04										
C 13	1,175E+01										
N 14	1,832E-03	1,892E-03	1,953E-03	2,012E-03	2,072E-03	2,132E-03	2,192E-03	2,311E-03	2,430E-03	2,549E-03	2,667E-03
N 15	1,325E-04										
O 16	6,968E+04										
O 17	2,837E+01										
O 18	1,604E+02										
F 19	6,292E-05										
NE 20	1,654E-09										
NE 21	3,197E-04										
NE 22	4,276E-18										
FE 58	1,178E-21										
CO 59	1,425E-18	1,747E-18									
NI 60	3,369E-19	2,982E-18	3,693E-18	3,884E-18	3,936E-18	3,950E-18	3,954E-18	3,955E-18	3,956E-18	3,956E-18	3,956E-18
NI 61	1,098E-16										
NI 62	3,870E-12										
NI 64	8,590E-10										
CU 63	1,548E-12	1,402E-11	2,566E-11	3,652E-11	4,666E-11	5,611E-11	6,495E-11	8,086E-11	9,474E-11	1,068E-10	1,173E-10
CU 65	2,150E-10	2,484E-10									
ZN 64	1,836E-15	1,840E-15									
ZN 66	4,010E-05	4,021E-05									

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
ZN 67	1,754E-04	1,760E-04									
ZN 68	3,180E-04										
ZN 70	1,800E-03										
GA 69	1,261E-04										
GA 71	3,716E-03										
GE 70	2,487E-06										
GE 72	8,388E-03	8,414E-03									
GE 73	1,795E-02										
GE 74	4,561E-02										
GE 76	2,277E-01										
AS 75	9,500E-02	9,506E-02									
SE 74	9,204E-08	9,469E-08									
SE 76	5,015E-03	5,028E-03									
SE 77	5,600E-01	5,611E-01									
SE 78	1,714E+00	1,715E+00									
SE 80	8,013E+00										
SE 82	2,262E+01										
BR 79	1,877E-05	4,164E-05	6,448E-05	8,736E-05	1,102E-04	1,331E-04	1,559E-04	2,017E-04	2,474E-04	2,931E-04	3,388E-04
BR 81	1,501E+01										
KR 80	9,443E-05										
KR 82	7,368E-01	7,394E-01									
KR 83	2,678E+01	2,679E+01									
KR 84	6,230E+01										
KR 86	9,303E+01										
RB 85	5,128E+01	5,730E+01	6,048E+01	6,214E+01	6,302E+01	6,349E+01	6,370E+01	6,391E+01	6,396E+01	6,396E+01	6,396E+01
RB 87	1,224E+02										
SR 84	1,076E-05	1,168E-05									
SR 86	3,062E-01	3,205E-01									
SR 87	2,997E-03										
SR 88	1,636E+02										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
Y 89	2,019E+02	2,141E+02									
ZR 90	1,243E+01	6,750E+01	1,105E+02	1,442E+02	1,705E+02	1,910E+02	2,072E+02	2,295E+02	2,433E+02	2,516E+02	2,567E+02
ZR 91	2,928E+02	3,138E+02									
ZR 92	3,763E+02	3,764E+02									
ZR 94	5,366E+02										
ZR 96	6,240E+02										
NB 93	5,470E-05	5,762E-04	1,636E-03	3,047E-03	4,686E-03	6,474E-03	8,356E-03	1,229E-02	1,634E-02	2,043E-02	2,454E-02
MO 94	1,252E-03	1,253E-03	1,254E-03	1,255E-03	1,255E-03	1,256E-03	1,257E-03	1,258E-03	1,260E-03	1,262E-03	1,264E-03
MO 95	4,864E+02	5,522E+02									
MO 96	3,994E+01										
MO 97	6,895E+02	6,900E+02									
MO 98	7,316E+02										
MO100	8,757E+02										
RU 96	1,201E-14										
RU 98	3,849E-05	3,853E-05	3,856E-05	3,860E-05	3,864E-05	3,867E-05	3,870E-05	3,878E-05	3,885E-05	3,892E-05	3,899E-05
RU 99	4,399E-03	2,794E-02	5,148E-02	7,504E-02	9,854E-02	1,221E-01	1,457E-01	1,927E-01	2,398E-01	2,868E-01	3,339E-01
RU100	1,211E+02										
RU101	7,540E+02										
RU102	8,991E+02										
RU104	8,622E+02										
RH103	5,907E+02	6,318E+02									
PD102	9,485E-04	1,470E-03									
PD104	2,557E+02										
PD105	6,963E+02	6,978E+02									
PD106	4,714E+02	7,010E+02									
PD108	3,410E+02										
PD110	1,106E+02										
AG107	8,913E-05	5,730E-04	1,057E-03	1,541E-03	2,025E-03	2,509E-03	2,993E-03	3,961E-03	4,929E-03	5,897E-03	6,864E-03
AG109	1,509E+02	1,511E+02									
CD106	1,397E-11										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
CD108	4,401E-03										
CD110	1,165E+02	1,187E+02									
CD111	5,155E+01	5,205E+01									
CD112	2,368E+01	2,371E+01									
CD113	3,632E-01	3,669E-01									
CD114	2,287E+01										
CD116	6,469E+00										
IN113	1,221E-03	3,734E-03	5,273E-03	6,214E-03	6,786E-03	7,140E-03	7,358E-03	7,566E-03	7,649E-03	7,680E-03	7,691E-03
IN115	2,078E+00	2,113E+00									
SN112	1,747E-13										
SN114	2,274E-04	2,460E-04									
SN115	3,050E-01	3,059E-01									
SN116	4,127E+00										
SN117	5,684E+00										
SN118	4,734E+00										
SN119	4,661E+00	4,667E+00									
SN120	4,638E+00										
SN122	6,172E+00										
SN124	1,006E+01										
SB121	4,470E+00	4,518E+00	4,555E+00	4,588E+00	4,617E+00	4,642E+00	4,664E+00	4,701E+00	4,730E+00	4,752E+00	4,769E+00
SB123	5,616E+00	5,782E+00									
TE122	5,183E-01	5,216E-01									
TE123	6,261E-03	7,966E-03									
TE124	4,294E-01	4,938E-01									
TE125	4,967E+00	1,338E+01	1,406E+01	1,411E+01							
TE126	6,526E-01	6,594E-01	6,614E-01	6,630E-01	6,646E-01	6,666E-01	6,682E-01	6,718E-01	6,750E-01	6,786E-01	6,822E-01
TE128	1,004E+02	1,005E+02									
TE130	3,722E+02										
I 127	5,954E+01	6,120E+01									
XE124	1,379E-13										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
XE126	3,787E-04	3,903E-04									
XE128	6,209E+00										
XE129	4,047E-02	4,200E-02	4,208E-02	4,217E-02	4,225E-02	4,233E-02	4,242E-02	4,259E-02	4,276E-02	4,293E-02	4,310E-02
XE130	7,405E+00	7,410E+00									
XE131	3,819E+02	3,880E+02									
XE132	1,137E+03	1,141E+03									
XE134	1,383E+03										
XE136	1,838E+03										
CS133	9,745E+02	9,833E+02									
BA130	2,682E-12										
BA132	6,755E-04	6,859E-04									
BA134	7,228E+01	2,206E+02	2,257E+02	2,259E+02							
BA135	7,368E-01	7,426E-01	7,452E-01	7,472E-01	7,493E-01	7,514E-01	7,540E-01	7,582E-01	7,628E-01	7,670E-01	7,717E-01
BA136	6,146E+01	6,287E+01									
BA137	5,221E+01	2,880E+02	4,751E+02	6,235E+02	7,415E+02	8,351E+02	9,095E+02	1,016E+03	1,082E+03	1,124E+03	1,151E+03
BA138	1,148E+03										
LA138	4,186E-02										
LA139	1,066E+03	1,067E+03									
CE136	1,053E-11										
CE138	2,176E-03										
CE140	1,025E+03	1,043E+03									
CE142	9,308E+02										
PR141	9,136E+02	9,500E+02									
ND142	1,550E+01	1,553E+01									
ND143	7,192E+02	7,342E+02									
ND144	6,750E+02	8,980E+02									
ND145	5,283E+02										
ND146	5,959E+02										
ND148	3,439E+02										
ND150	2,043E+02										

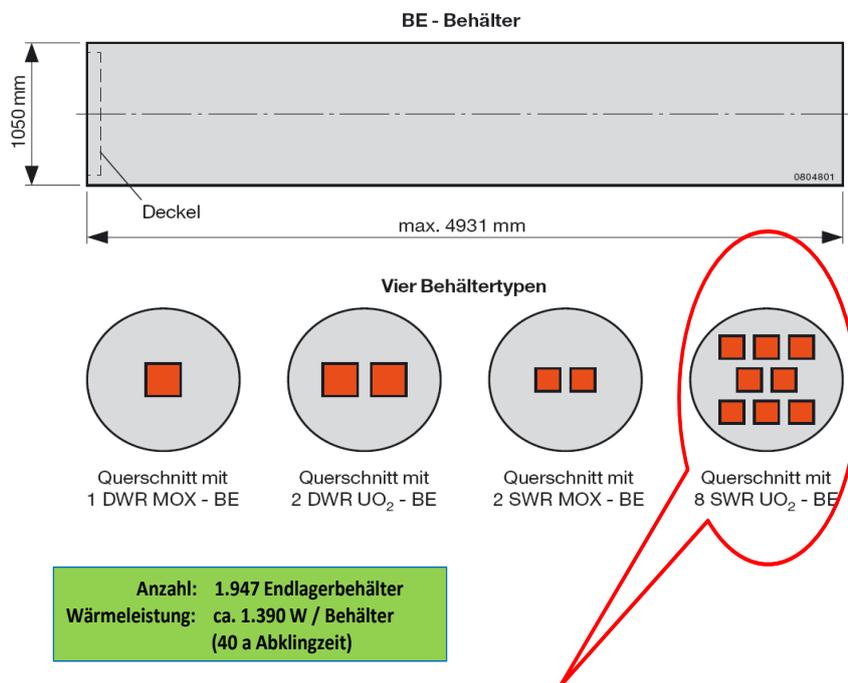
Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
SM144	2,977E-10										
SM147	6,198E+01	1,834E+02	1,920E+02	1,927E+02							
SM148	1,533E+02	1,566E+02									
SM149	5,314E+00	6,313E+00									
SM150	2,661E+02										
SM152	1,241E+02	1,242E+02									
SM154	5,736E+01										
EU151	7,264E-02	2,285E+00	4,334E+00	6,230E+00	7,987E+00	9,615E+00	1,112E+01	1,381E+01	1,611E+01	1,808E+01	1,978E+01
EU153	1,468E+02	1,479E+02									
GD152	1,481E-01	1,547E-01	1,585E-01	1,607E-01	1,621E-01	1,629E-01	1,634E-01	1,638E-01	1,640E-01	1,640E-01	1,641E-01
GD154	5,011E+00	3,205E+01	4,412E+01	4,950E+01	5,191E+01	5,299E+01	5,346E+01	5,377E+01	5,382E+01	5,387E+01	5,387E+01
GD155	3,598E-01	1,132E+01	1,381E+01	1,437E+01	1,450E+01	1,453E+01	1,454E+01	1,454E+01	1,454E+01	1,454E+01	1,454E+01
GD156	1,056E+02	1,098E+02									
GD157	4,376E-01	4,572E-01									
GD158	3,589E+01										
GD160	2,453E+00										
TB159	5,392E+00	5,403E+00									
DY156	2,988E-14										
DY158	2,203E-06	3,849E-06	5,418E-06	6,921E-06	8,351E-06	9,719E-06	1,103E-05	1,346E-05	1,569E-05	1,772E-05	1,956E-05
DY160	6,578E-01	8,804E-01									
DY161	9,532E-01	9,662E-01									
DY162	4,987E-01										
DY163	4,544E-01										
DY164	2,059E-01										
HO165	1,135E-01										
ER162	8,330E-15										
ER164	1,451E-06										
ER166	3,815E-02	3,836E-02	3,836E-02	3,837E-02	3,837E-02	3,838E-02	3,838E-02	3,839E-02	3,840E-02	3,841E-02	3,841E-02
ER167	1,795E-03	1,796E-03									
ER168	5,491E-03										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 1 DWR MOX-Brennelement in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
ER170	3,025E-04	3,026E-04									
TM169	4,123E-04	4,250E-04									
YB168	1,688E-12										
YB170	2,719E-04	3,678E-04									
YB171	8,897E-05	1,700E-04	1,722E-04	1,723E-04							
YB172	2,279E-04	2,293E-04									
YB173	4,272E-06										
YB174	6,999E-07										
YB176	1,350E-12	1,351E-12									
LU175	1,044E-08	1,071E-08									
LU176	7,353E-11										
HF174	5,829E-18										
HF176	1,297E-09	1,299E-09									
HF177	1,128E-10	1,168E-10									
HF178	7,571E-11										
HF179	5,710E-12										
HF180	4,224E-13										
TA181	1,621E-15	2,567E-15									
W 182	2,126E-17	5,658E-17									
W 183	6,386E-17	6,874E-17									
W 184	2,386E-18										
RE185	1,783E-21	4,776E-21									
TL205	6,183E-20	6,204E-20	6,224E-20	6,240E-20	6,261E-20	6,282E-20	6,297E-20	6,339E-20	6,375E-20	6,412E-20	6,453E-20
PB204	1,484E-19	1,539E-19	1,548E-19	1,550E-19							
PB206	2,108E-11	2,983E-10	6,458E-10	1,460E-09	3,519E-09	8,050E-09	1,677E-08	5,621E-08	1,456E-07	3,163E-07	6,063E-07
PB207	1,599E-10	3,814E-09	1,290E-08	2,669E-08	4,465E-08	6,640E-08	9,168E-08	1,519E-07	2,245E-07	3,087E-07	4,045E-07
PB208	4,636E-07	3,940E-05	1,077E-04	1,743E-04	2,350E-04	2,901E-04	3,399E-04	4,258E-04	4,962E-04	5,538E-04	6,011E-04
PB209	3,540E-14	2,155E-14	2,442E-14	2,852E-14	3,424E-14	4,202E-14	5,231E-14	8,247E-14	1,286E-13	1,946E-13	2,843E-13
BI209	5,616E-11	4,419E-10	8,694E-10	1,361E-09	1,944E-09	2,653E-09	3,528E-09	6,001E-09	9,885E-09	1,585E-08	2,471E-08
TH232	2,519E-05	1,432E-04	2,641E-04	3,880E-04	5,149E-04	6,448E-04	7,779E-04	1,052E-03	1,340E-03	1,639E-03	1,951E-03

A3: BE-Behälter mit acht SWR UO₂-Brennelementen



Radionuklidinventar BE-Behälter mit 8 SWR UO₂ BE							
(OREST-Abbrandrechnung 40 a nach Entladung)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	8,538E+12	Ba-137m	3,064E+15	Po-218	2,181E+05	Pu-238	2,277E+14
Be-10	1,685E+07	Ce-144	1,797E+01	At-217	3,840E+04	Pu-239	1,630E+13
C-14	9,946E+10	Pr-144	1,797E+01	Rn-219	1,450E+06	Pu-240	3,206E+13
Cl-36	4,485E+09	PR-144m	2,516E-01	Rn-220	2,407E+09	Pu-241	1,169E+15
Fe-55	1,565E+08	Pm-146	1,284E+08	Rn-222	2,181E+05	Pu-242	1,926E+11
Co-60	2,518E+11	Pm-147	2,237E+11	Fr-221	3,840E+04	Am-241	2,305E+14
Ni-59	1,896E+09	Sm-146	2,981E+04	Fr-223	2,028E+04	Am-242m	4,880E+11
Ni-63	2,055E+11	Sm-147	3,801E+05	Ra-223	1,450E+06	Am-242	4,861E+11
Se-79	1,509E+09	Sm-151	1,353E+13	Ra-224	2,407E+09	Am-243	2,154E+12
Sr-90	2,117E+15	Eu-152	1,034E+10	Ra-225	3,840E+04	Cm-242	4,020E+11
Y-90	2,117E+15	Eu-154	1,828E+13	Ra-226	2,181E+05	Cm-243	7,699E+11
Zr-93	1,375E+11	Eu-155	9,923E+11	Ac-225	3,840E+04	Cm-244	7,536E+13
Nb-93m	1,167E+11	Hg-166m	4,126E+08	Ac-227	1,449E+06	Cm-245	3,519E+10
Nb-94	2,203E+07	Tl-207	1,446E+06	Th-227	1,430E+06	Cm-246	9,845E+09
Mo-93	1,423E+09	Tl-208	8,640E+08	Th-228	2,406E+09	Summe	1,240E+16
Tc-99	1,042E+12	Tl-209	8,064E+02	Th-229	3,840E+04		
Ru-106	4,517E+04	Tl-210	5,234E+01	Th-230	2,460E+07		
Rh-106	4,518E+04	Pb-209	3,840E+04	Th-231	5,923E+08		
Pd-107	9,305E+09	Pb-210	7,646E+04	Th-234	1,631E+10		
Ag-108	4,962E+07	Pb-211	1,450E+06	Pa-231	2,186E+06		
Ag-108m	5,702E+08	Pb-212	2,407E+09	Pa-233	2,726E+10		
Ag-109m	2,067E+01	Pb-214	2,181E+05	Pa-234m	1,631E+10		
Cd-109	2,067E+01	Bi-210	7,649E+04	Pa-234	2,121E+07		
Cd-113m	2,874E+09	Bi-211	1,450E+06	U-232	2,341E+09		
Sn-121	5,010E+11	Bi-212	2,407E+09	U-233	5,656E+06		
Sn-121m	6,456E+11	Bi-213	3,840E+04	U-234	7,516E+10		
Sb-125	2,026E+10	Bi-214	2,181E+05	U-235	5,922E+08		
Sb-126	5,883E+09	Po-210	7,649E+04	U-236	1,759E+10		
Sb-126m	4,203E+10	Po-211	4,351E+03	U-237	2,808E+10		
Te-125m	4,950E+09	Po-212	1,542E+09	U-238	1,631E+10		
I-129	2,096E+09	Po-213	3,759E+04	Np-237	2,726E+10		
Cs-134	2,142E+10	Po-214	2,181E+05	Np-238	2,196E+09		
Cs-135	3,992E+10	Po-215	1,450E+06	Np-239	2,154E+12		
Cs-137	3,245E+15	Po-216	2,407E+09	Pu-236	3,742E+06		

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
H 1	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02	6,12E-02
H 2	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03	5,81E-03
HE 3	3,16E-03	1,00E-01	1,56E-01	1,87E-01	2,05E-01	2,16E-01	2,21E-01	2,27E-01	2,28E-01	2,29E-01	2,29E-01
HE 4	1,09E+01	1,30E+01	1,44E+01	1,57E+01	1,70E+01	1,82E+01	1,93E+01	2,14E+01	2,34E+01	2,52E+01	2,68E+01
LI 6	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02	2,82E-02
LI 7	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00	3,11E+00
BE 9	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03	2,03E-03
B 10	1,55E-06	1,55E-06	1,55E-06	1,55E-06	1,55E-06	1,56E-06	1,56E-06	1,56E-06	1,56E-06	1,56E-06	1,56E-06
B 11	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01	7,14E-01
C 12	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01	3,18E+01
C 13	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01
N 14	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01	7,95E+01
N 15	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01	3,35E-01
O 16	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05
O 17	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01	7,72E+01
O 18	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,37E+02
F 19	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,41E+01
NE 20	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03
NE 21	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02	1,21E-02
NE 22	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03	1,39E-03
FE 58	5,48E-01	5,49E-01	5,49E-01	5,49E-01							
CO 59	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00	8,12E+00
NI 60	2,18E+01	2,26E+01	2,29E+01	2,29E+01	2,30E+01	2,30E+01	2,30E+01	2,30E+01	2,30E+01	2,30E+01	2,30E+01
NI 61	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00
NI 62	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00	2,94E+00
NI 63	1,29E-01	1,21E-01	1,12E-01	1,05E-01	9,79E-02	9,14E-02	8,53E-02	7,43E-02	6,47E-02	5,63E-02	4,90E-02
CU 63	2,71E+01	2,71E+01	2,71E+01	2,71E+01	2,71E+01	2,71E+01	2,72E+01	2,72E+01	2,72E+01	2,72E+01	2,72E+01
CU 65	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,26E+01
ZN 64	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01	1,54E+01
ZN 66	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00	9,13E+00

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
ZN 67	1,32E+00										
ZN 68	6,31E+00										
ZN 70	2,16E-01										
GA 69	3,51E-02										
GA 71	4,99E-03										
GE 70	4,64E-04										
GE 72	1,32E-02										
GE 73	3,32E-02										
GE 74	9,70E-02										
GE 76	6,51E-01										
AS 75	2,39E-01										
SE 74	1,21E-07	1,25E-07									
SE 76	1,01E-02										
SE 77	1,55E+00										
SE 78	4,74E+00										
SE 80	2,66E+01										
SE 82	7,01E+01										
BR 79	3,47E-05	9,72E-05	1,60E-04	2,22E-04	2,85E-04	3,47E-04	4,10E-04	5,34E-04	6,59E-04	7,84E-04	9,09E-04
BR 81	4,40E+01										
KR 80	1,25E-04										
KR 82	1,72E+00	1,73E+00									
KR 83	7,44E+01										
KR 84	2,54E+02										
KR 86	3,81E+02										
RB 85	2,08E+02	2,31E+02	2,43E+02	2,49E+02	2,52E+02	2,54E+02	2,55E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02
RB 87	5,15E+02										
SR 84	3,17E-05	3,35E-05									
SR 86	1,10E+00	1,13E+00									
SR 87	6,07E-03	6,08E-03									
SR 88	7,09E+02										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
Y 89	9,22E+02	9,46E+02	9,46E+02	9,46E+02							
ZR 90	8,57E+01	3,22E+02	5,07E+02	6,52E+02	7,65E+02	8,54E+02	9,23E+02	1,02E+03	1,08E+03	1,11E+03	1,14E+03
ZR 91	1,20E+03	1,24E+03	1,24E+03	1,24E+03							
ZR 92	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03	1,36E+03
ZR 94	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03
ZR 96	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03	1,70E+03
NB 93	2,15E-04	2,13E-03	5,75E-03	1,05E-02	1,59E-02	2,18E-02	2,80E-02	4,09E-02	5,42E-02	6,76E-02	8,11E-02
MO 94	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01	1,46E+01
MO 95	1,49E+03	1,59E+03	1,59E+03	1,59E+03							
MO 96	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02
MO 97	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03	1,73E+03
MO 98	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03	1,79E+03
MO100	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03	2,02E+03
RU 98	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04	1,88E-04	1,88E-04	1,88E-04
RU 99	1,47E-02	6,87E-02	1,23E-01	1,77E-01	2,31E-01	2,85E-01	3,39E-01	4,47E-01	5,55E-01	6,63E-01	7,71E-01
RU100	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02	2,82E+02
RU101	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03	1,65E+03
RU102	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03	1,74E+03
RU104	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03	1,23E+03
RH103	8,63E+02	9,14E+02	9,14E+02	9,14E+02							
PD102	1,01E-03	1,40E-03	1,40E-03	1,40E-03							
PD104	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02	5,72E+02
PD105	8,77E+02	8,78E+02	8,78E+02	8,78E+02							
PD106	5,61E+02	8,07E+02	8,07E+02	8,07E+02							
PD108	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02	3,37E+02
PD110	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,08E+02
AG107	3,36E-01	3,36E-01	3,37E-01	3,37E-01	3,38E-01	3,38E-01	3,39E-01	3,40E-01	3,41E-01	3,42E-01	3,43E-01
AG108	1,18E-07	2,15E-12	2,04E-12	1,93E-12	1,83E-12	1,73E-12	1,64E-12	1,47E-12	1,32E-12	1,18E-12	1,06E-12
CD106	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03	9,69E-03
CD108	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02	8,32E-02

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
CD110	9,38E+01	9,55E+01	9,55E+01	9,55E+01							
CD111	5,04E+01	5,08E+01	5,08E+01	5,08E+01							
CD112	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01	2,53E+01
CD113	1,34E-01	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01							
CD114	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01	2,83E+01
CD116	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00	9,98E+00
IN113	1,49E-01	1,50E-01	1,51E-01	1,51E-01	1,52E-01	1,52E-01	1,52E-01	1,52E-01	1,52E-01	1,52E-01	1,52E-01
IN115	3,03E+00	3,07E+00	3,07E+00	3,07E+00							
SN112	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02	7,31E-02
SN114	1,06E-01	1,07E-01	1,07E-01	1,07E-01							
SN115	4,44E-01	4,45E-01	4,45E-01	4,45E-01							
SN116	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01
SN117	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00	9,63E+00
SN118	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00	9,62E+00
SN119	8,54E+00	8,55E+00	8,55E+00	8,55E+00							
SN120	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01	1,04E+01
SN122	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01
SN124	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01	1,75E+01
SB121	7,41E+00	7,48E+00	7,53E+00	7,58E+00	7,63E+00	7,67E+00	7,70E+00	7,76E+00	7,80E+00	7,83E+00	7,86E+00
SB123	9,50E+00	9,71E+00	9,71E+00	9,71E+00							
TE122	7,29E-01	7,32E-01	7,32E-01	7,32E-01							
TE123	6,74E-03	8,29E-03	8,29E-03	8,29E-03							
TE124	5,96E-01	6,62E-01	6,62E-01	6,62E-01							
TE125	9,54E+00	2,20E+01	2,30E+01	2,31E+01	2,31E+01	2,31E+01	2,31E+01	2,31E+01	2,31E+01	2,31E+01	2,31E+01
TE126	1,28E+00	1,28E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,30E+00	1,30E+00	1,31E+00	1,31E+00	1,32E+00
TE128	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02
TE130	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02	8,03E+02
I 127	9,81E+01	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02							
XE126	4,56E-04	4,67E-04	4,67E-04	4,67E-04							
XE128	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00	7,79E+00

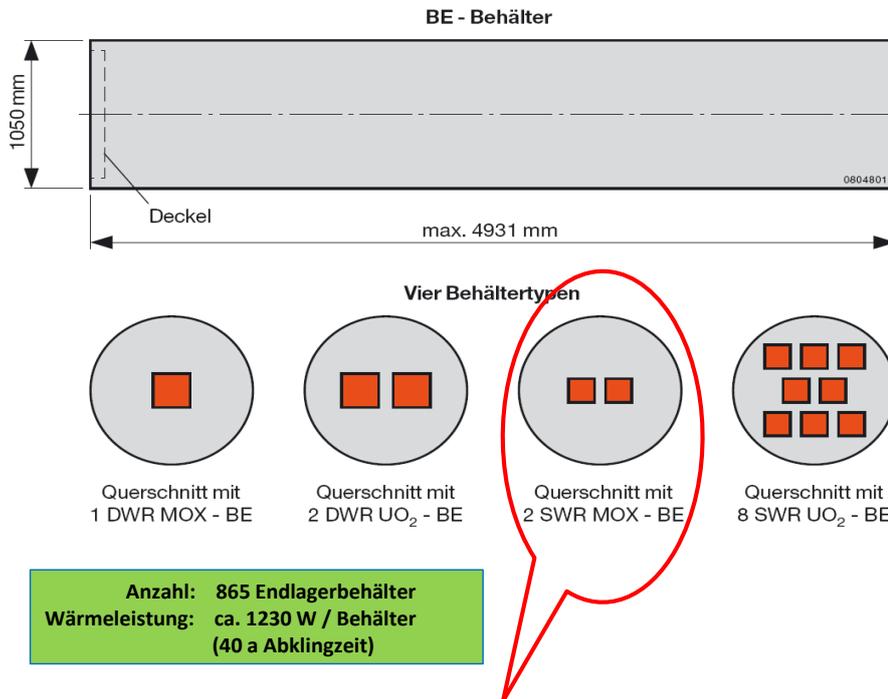
Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
XE129	6,48E-02	6,66E-02	6,67E-02	6,69E-02	6,70E-02	6,71E-02	6,73E-02	6,76E-02	6,79E-02	6,81E-02	6,84E-02
XE130	2,15E+01										
XE131	8,01E+02	8,09E+02									
XE132	2,46E+03										
XE134	3,26E+03										
XE136	4,80E+03										
CS133	2,26E+03	2,28E+03									
BA130	2,79E-12										
BA134	2,10E+02	5,06E+02	5,16E+02								
BA135	1,92E+00	1,93E+00	1,93E+00	1,94E+00	1,94E+00	1,94E+00	1,95E+00	1,95E+00	1,96E+00	1,96E+00	1,97E+00
BA136	7,88E+01	8,00E+01									
BA137	1,64E+02	6,88E+02	1,10E+03	1,43E+03	1,69E+03	1,90E+03	2,07E+03	2,30E+03	2,45E+03	2,54E+03	2,60E+03
BA138	2,79E+03										
LA138	7,02E-02										
LA139	2,59E+03										
CE136	1,46E-11										
CE138	4,77E-03										
CE140	2,72E+03	2,75E+03									
CE142	2,40E+03										
PR141	2,31E+03	2,36E+03									
ND142	6,31E+01	6,32E+01									
ND143	1,43E+03	1,45E+03									
ND144	2,67E+03	3,08E+03									
ND145	1,36E+03										
ND146	1,55E+03										
ND148	7,86E+02										
ND150	3,81E+02										
SM144	9,27E-02										
SM147	1,96E+02	4,30E+02	4,46E+02	4,48E+02							
SM148	3,51E+02	3,54E+02									

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
SM149	2,59E+00	4,04E+00	4,04E+00	4,04E+00							
SM150	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02	5,77E+02
SM152	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02	2,46E+02
SM154	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01	7,85E+01
EU151	2,43E-02	1,42E+00	2,72E+00	3,92E+00	5,04E+00	6,06E+00	7,02E+00	8,72E+00	1,02E+01	1,14E+01	1,25E+01
EU153	2,63E+02	2,64E+02	2,64E+02	2,64E+02							
GD152	8,23E-02	8,38E-02	8,47E-02	8,52E-02	8,55E-02	8,57E-02	8,58E-02	8,59E-02	8,59E-02	8,59E-02	8,59E-02
GD154	6,98E+00	3,24E+01	4,38E+01	4,89E+01	5,11E+01	5,22E+01	5,26E+01	5,29E+01	5,30E+01	5,30E+01	5,30E+01
GD155	1,59E-01	1,58E+01	1,94E+01	2,02E+01	2,04E+01	2,04E+01	2,04E+01	2,04E+01	2,04E+01	2,04E+01	2,04E+01
GD156	2,46E+02	2,53E+02	2,53E+02	2,53E+02							
GD157	1,59E-01	1,85E-01	1,85E-01	1,85E-01							
GD158	4,61E+01	4,62E+01	4,62E+01	4,62E+01							
GD160	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00	2,73E+00
TB159	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00	5,48E+00
DY156	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04	1,65E-04
DY158	6,00E-04	6,01E-04	6,02E-04	6,03E-04	6,03E-04	6,04E-04	6,05E-04	6,06E-04	6,07E-04	6,09E-04	6,10E-04
DY160	5,39E-01	6,77E-01	6,77E-01	6,77E-01							
DY161	7,25E-01	7,37E-01	7,37E-01	7,37E-01							
DY162	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01	6,12E-01
DY163	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01	6,53E-01
DY164	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01
HO165	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01	5,42E-01
ER162	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14	1,59E-14
ER164	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06	4,51E-06
ER166	2,46E-01	2,46E-01	2,46E-01	2,46E-01	2,46E-01	2,46E-01	2,46E-01	2,46E-01	2,47E-01	2,47E-01	2,47E-01
ER167	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03	7,74E-03
ER168	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02	2,24E-02
ER170	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04	4,28E-04
TM169	6,87E-04	7,06E-04	7,06E-04	7,06E-04							
YB168	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13	9,83E-13

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 8 SWR UO₂-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
YB170	3,76E-04	4,89E-04	4,89E-04	4,89E-04							
YB171	1,30E-04	2,34E-04	2,37E-04	2,37E-04	2,37E-04						
YB172	4,21E-04	4,23E-04	4,23E-04	4,23E-04							
YB173	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06	6,03E-06
YB174	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07	8,09E-07
YB176	4,32E-12	4,33E-12	4,33E-12	4,33E-12							
LU175	3,77E-08	3,83E-08	3,83E-08	3,83E-08							
LU176	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11	9,64E-11
HF174	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17	1,08E-17
HF176	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09	4,19E-09
HF177	1,19E-09	1,20E-09	1,20E-09	1,20E-09							
HF178	4,88E-09	4,94E-09	4,94E-09	4,94E-09							
HF179	1,27E-06	2,47E-06	2,49E-06	2,49E-06	2,49E-06						
HF180	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,38E-06
TA181	2,03E-02	2,33E-02	2,33E-02	2,33E-02							
W 182	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01	1,17E+01
W 183	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01	1,55E+01
W 184	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01	2,93E+01
RE185	2,95E-01	3,44E-01	3,44E-01	3,44E-01							
TL205	1,75E-06	1,75E-06	1,75E-06	1,75E-06	1,75E-06	1,76E-06	1,76E-06	1,76E-06	1,76E-06	1,76E-06	1,76E-06
PB204	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01	4,42E-01
PB205	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03
PB206	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00	7,71E+00
PB208	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01	1,69E+01
PB209	4,16E-08	1,65E-13	1,79E-13	1,99E-13	2,25E-13	2,57E-13	2,95E-13	3,91E-13	5,14E-13	6,66E-13	8,47E-13
BI209	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00	3,22E+00
TH232	7,32E-04	2,86E-03	5,00E-03	7,13E-03	9,27E-03	1,14E-02	1,35E-02	1,78E-02	2,21E-02	2,64E-02	3,07E-02

A4: BE-Behälter mit zwei SWR MOX-Brennelementen



Radionuklidinventar BE-Behälter mit 2 SWR MOX BE							
(OREST-Abbrandrechnung 40 a nach Entladung)							
Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]	Nuklid	[Bq]
H-3	1,498E+12	Pr-144	3,983E+00	Rn-219	1,534E+05	Pu-240	5,618E+13
Be-10	5,122E+06	PR-144m	5,576E-02	Rn-220	3,036E+08	Pu-241	1,873E+15
C-14	5,434E+09	Pm-146	1,414E+08	Rn-222	8,075E+04	Pu-242	3,929E+11
Cl-36	1,121E+09	Pm-147	6,553E+10	Fr-221	5,395E+03	Am-241	4,064E+14
Co-60	6,234E-07	Sm-146	1,305E+04	Fr-223	2,145E+03	Am-242m	3,660E+12
Ni-63	1,686E+02	Sm-147	1,184E+05	Ra-223	1,534E+05	Am-242	3,646E+12
Se-79	3,767E+08	Sm-151	1,142E+13	Ra-224	3,036E+08	Am-243	4,949E+12
Sr-90	3,240E+14	Eu-152	3,650E+10	Ra-225	5,395E+03	Cm-242	3,015E+12
Y-90	3,241E+14	Eu-154	1,174E+13	Ra-226	8,075E+04	Cm-243	2,293E+12
Zr-93	2,890E+10	Eu-155	4,478E+11	Ac-225	5,395E+03	Cm-244	2,869E+14
Nb-93m	2,440E+10	Ho-166m	3,795E+07	Ac-227	1,532E+05	Cm-245	3,269E+11
Nb-94	8,708E+06	Tl-207	1,530E+05	Th-227	1,513E+05	Cm-246	5,763E+10
Tc-99	3,064E+11	Tl-208	1,090E+08	Th-228	3,035E+08	Summe	5,576E+15
Ru-106	1,799E+04	Tl-209	1,133E+02	Th-229	5,395E+03		
Rh-106	1,806E+04	Tl-210	1,939E+01	Th-230	1,196E+07		
Pd-107	5,961E+09	Pb-209	5,395E+03	Th-231	7,898E+07		
Ag-108	6,885E+04	Pb-210	2,303E+04	Th-234	3,855E+09		
Ag-108m	7,912E+05	Pb-211	1,534E+05	Pa-231	2,360E+05		
Ag-109m	6,068E-01	Pb-212	3,036E+08	Pa-233	5,951E+09		
Cd-109	6,068E-01	Pb-214	8,078E+04	Pa-234m	3,855E+09		
Cd-113m	3,990E+09	Bi-210	2,304E+04	Pa-234	5,009E+06		
Sn-121	2,211E+11	Bi-211	1,534E+05	U-232	2,952E+08		
Sn-121m	2,849E+11	Bi-212	3,036E+08	U-233	8,524E+05		
Sn-126	1,804E+10	Bi-213	5,395E+03	U-234	5,416E+10		
Sb-125	7,052E+09	Bi-214	8,078E+04	U-235	7,898E+07		
Sb-126	2,526E+09	Po-210	2,304E+04	U-236	7,147E+08		
Sb-126m	1,804E+10	Po-211	4,602E+02	U-237	4,499E+10		
Te-125m	1,723E+09	Po-212	1,946E+08	U-238	3,852E+09		
I-129	8,556E+08	Po-213	5,282E+03	Np-237	5,951E+09		
Cs-134	5,735E+09	Po-214	8,075E+04	Np-238	1,647E+10		
Cs-135	2,527E+10	Po-215	1,534E+05	Np-239	4,949E+12		
Cs-137	9,664E+14	Po-216	3,036E+08	Pu-236	4,722E+05		
Ba-137m	9,126E+14	Po-218	8,078E+04	Pu-238	3,547E+14		
Ce-144	3,983E+00	At-217	5,395E+03	Pu-239	1,463E+13		

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
H 1	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,13E-03
H 2	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03	1,71E-03
HE 3	1,78E-03	1,88E-02	2,85E-02	3,41E-02	3,72E-02	3,90E-02	4,01E-02	4,10E-02	4,13E-02	4,14E-02	4,14E-02
HE 4	1,09E+01	1,58E+01	1,91E+01	2,19E+01	2,44E+01	2,66E+01	2,87E+01	3,24E+01	3,58E+01	3,88E+01	4,16E+01
LI 6	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03	8,55E-03
LI 7	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04	6,60E-04
BE 9	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04	5,88E-04
B 10	3,37E-11	4,27E-10	8,20E-10	1,21E-09	1,61E-09	2,00E-09	2,39E-09	3,18E-09	3,96E-09	4,75E-09	5,54E-09
B 11	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07	5,73E-07
C 12	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04	1,32E-04
C 13	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00	7,15E+00
N 14	1,12E-03	1,16E-03	1,19E-03	1,23E-03	1,27E-03	1,31E-03	1,34E-03	1,42E-03	1,49E-03	1,56E-03	1,64E-03
N 15	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05	8,09E-05
O 16	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04	4,74E+04
O 17	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01	1,93E+01
O 18	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02	1,09E+02
F 19	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,28E-05
NE 20	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09	1,02E-09
NE 21	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04	2,27E-04
NE 22	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18	3,17E-18
FE 58	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22	5,36E-22
CO 59	6,43E-19	7,14E-19	7,14E-19	7,14E-19							
NI 60	4,78E-19	2,56E-18	3,12E-18	3,27E-18	3,31E-18	3,32E-18	3,33E-18	3,33E-18	3,33E-18	3,33E-18	3,33E-18
NI 61	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17	5,47E-17
NI 62	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12	1,73E-12
NI 63	1,06E-10	9,89E-11	9,23E-11	8,61E-11	8,04E-11	7,50E-11	7,00E-11	6,10E-11	5,31E-11	4,62E-11	4,02E-11
CU 63	1,53E-12	8,62E-12	1,52E-11	2,14E-11	2,72E-11	3,25E-11	3,76E-11	4,66E-11	5,45E-11	6,13E-11	6,73E-11
CU 65	1,31E-10	1,44E-10	1,44E-10	1,44E-10							
ZN 64	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15	1,64E-15
ZN 66	2,56E-05	2,57E-05	2,57E-05	2,57E-05							

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]

Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
ZN 67	1,10E-04										
ZN 68	2,03E-04										
ZN 70	1,21E-03										
GA 69	8,58E-05										
GA 71	2,53E-03										
GE 70	1,58E-06										
GE 72	5,72E-03										
GE 73	1,22E-02										
GE 74	3,10E-02										
GE 76	1,56E-01										
AS 75	6,52E-02										
SE 74	6,51E-08	6,60E-08									
SE 76	3,14E-03										
SE 77	3,74E-01										
SE 78	1,17E+00										
SE 80	5,47E+00										
SE 82	1,54E+01										
BR 79	1,50E-05	3,06E-05	4,62E-05	6,17E-05	7,73E-05	9,29E-05	1,08E-04	1,40E-04	1,71E-04	2,02E-04	2,33E-04
BR 81	1,03E+01										
KR 80	6,49E-05										
KR 82	4,65E-01	4,66E-01									
KR 83	1,81E+01										
KR 84	4,24E+01										
KR 86	6,32E+01										
RB 85	3,57E+01	3,94E+01	4,14E+01	4,25E+01	4,30E+01	4,33E+01	4,34E+01	4,36E+01	4,36E+01	4,36E+01	4,36E+01
RB 87	8,32E+01										
SR 84	7,00E-06	7,30E-06									
SR 86	1,93E-01	1,98E-01									
SR 87	1,95E-03										
SR 88	1,11E+02										

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
Y 89	1,41E+02	1,46E+02	1,46E+02	1,46E+02							
ZR 90	1,41E+01	5,03E+01	7,87E+01	1,01E+02	1,18E+02	1,32E+02	1,42E+02	1,57E+02	1,66E+02	1,72E+02	1,75E+02
ZR 91	2,06E+02	2,13E+02	2,13E+02	2,13E+02							
ZR 92	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02
ZR 94	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02	3,65E+02
ZR 96	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02	4,25E+02
NB 93	6,43E-05	4,79E-04	1,24E-03	2,23E-03	3,36E-03	4,59E-03	5,88E-03	8,57E-03	1,13E-02	1,41E-02	1,69E-02
MO 94	8,56E-04	8,56E-04	8,57E-04	8,57E-04	8,58E-04	8,58E-04	8,58E-04	8,60E-04	8,60E-04	8,61E-04	8,62E-04
MO 95	3,54E+02	3,77E+02	3,77E+02	3,77E+02							
MO 96	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01	2,66E+01
MO 97	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02	4,64E+02
MO 98	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02	4,98E+02
MO100	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02	5,97E+02
RU 98	2,65E-05	2,65E-05	2,65E-05	2,65E-05	2,66E-05	2,66E-05	2,66E-05	2,66E-05	2,67E-05	2,67E-05	2,68E-05
RU 99	5,13E-03	2,10E-02	3,69E-02	5,28E-02	6,87E-02	8,46E-02	1,00E-01	1,32E-01	1,64E-01	1,96E-01	2,28E-01
RU100	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01	7,87E+01
RU101	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02	5,17E+02
RU102	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02	6,10E+02
RU104	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02	5,82E+02
RH103	4,12E+02	4,26E+02	4,26E+02	4,26E+02							
PD102	7,37E-04	9,41E-04	9,41E-04	9,41E-04							
PD104	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02	1,86E+02
PD105	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02	4,79E+02
PD106	3,75E+02	4,72E+02	4,72E+02	4,72E+02							
PD108	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02	2,34E+02
PD110	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01	7,60E+01
AG107	1,05E-04	4,40E-04	7,74E-04	1,11E-03	1,44E-03	1,78E-03	2,11E-03	2,78E-03	3,45E-03	4,11E-03	4,78E-03
AG108	5,39E-09	2,98E-15	2,82E-15	2,67E-15	2,53E-15	2,40E-15	2,27E-15	2,04E-15	1,83E-15	1,64E-15	1,47E-15
CD106	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11	1,24E-11
CD108	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03	2,75E-03

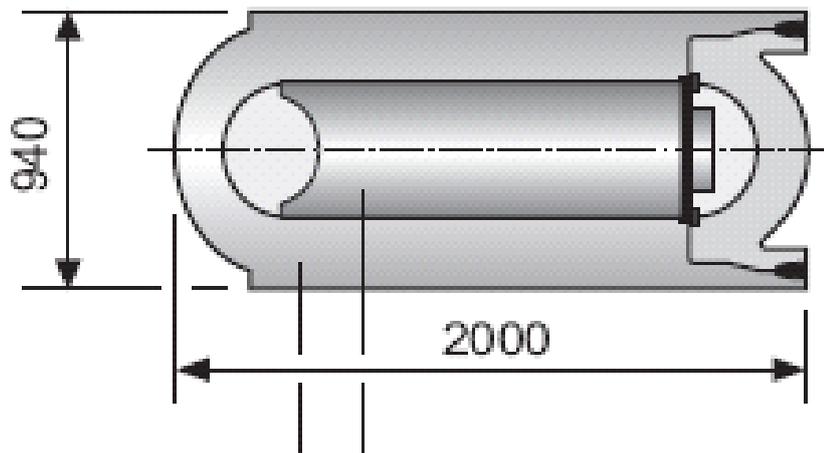
Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
CD110	7,88E+01	7,98E+01	7,98E+01	7,98E+01							
CD111	3,53E+01	3,55E+01	3,55E+01	3,55E+01							
CD112	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01
CD113	1,93E-01	1,94E-01	1,94E-01	1,94E-01							
CD114	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01	1,57E+01
CD116	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00	4,40E+00
IN113	1,23E-03	2,56E-03	3,37E-03	3,87E-03	4,17E-03	4,36E-03	4,47E-03	4,58E-03	4,63E-03	4,64E-03	4,65E-03
IN115	1,39E+00	1,40E+00	1,40E+00	1,40E+00							
SN112	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13	1,64E-13
SN114	2,30E-04	2,39E-04	2,39E-04	2,39E-04							
SN115	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01	2,03E-01
SN116	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00
SN117	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00	3,87E+00
SN118	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00	3,21E+00
SN119	3,16E+00	3,17E+00	3,17E+00	3,17E+00							
SN120	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00	3,15E+00
SN122	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,19E+00
SN124	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00	6,86E+00
SB121	3,06E+00	3,09E+00	3,12E+00	3,14E+00	3,16E+00	3,17E+00	3,19E+00	3,21E+00	3,23E+00	3,25E+00	3,26E+00
SB123	3,88E+00	3,94E+00	3,94E+00	3,94E+00							
TE122	3,39E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01							
TE123	4,11E-03	4,82E-03	4,82E-03	4,82E-03							
TE124	2,99E-01	3,21E-01	3,21E-01	3,21E-01							
TE125	4,92E+00	9,26E+00	9,61E+00	9,63E+00	9,64E+00	9,64E+00	9,64E+00	9,64E+00	9,64E+00	9,64E+00	9,64E+00
TE126	4,36E-01	4,39E-01	4,40E-01	4,41E-01	4,43E-01	4,44E-01	4,45E-01	4,47E-01	4,50E-01	4,52E-01	4,54E-01
TE128	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01	6,86E+01
TE130	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02	2,54E+02
I 127	4,11E+01	4,16E+01	4,16E+01	4,16E+01							
XE124	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13	1,06E-13
XE126	3,22E-04	3,27E-04	3,27E-04	3,27E-04							

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
XE128	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00	3,92E+00
XE129	2,48E-02	2,53E-02	2,53E-02	2,54E-02	2,55E-02	2,55E-02	2,56E-02	2,57E-02	2,58E-02	2,59E-02	2,60E-02
XE130	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00	5,14E+00
XE131	2,69E+02	2,71E+02	2,71E+02	2,71E+02							
XE132	7,67E+02	7,69E+02	7,69E+02	7,69E+02							
XE134	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02	9,42E+02
XE136	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03	1,16E+03
CS133	6,81E+02	6,85E+02	6,85E+02	6,85E+02							
BA130	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12	1,56E-12
BA134	7,09E+01	1,50E+02	1,53E+02	1,53E+02	1,53E+02						
BA135	6,60E-01	6,64E-01	6,66E-01	6,68E-01	6,69E-01	6,71E-01	6,73E-01	6,76E-01	6,80E-01	6,84E-01	6,87E-01
BA136	4,48E+01	4,53E+01	4,53E+01	4,53E+01							
BA137	5,94E+01	2,15E+02	3,39E+02	4,37E+02	5,15E+02	5,77E+02	6,27E+02	6,96E+02	7,41E+02	7,68E+02	7,86E+02
BA138	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02	7,83E+02
LA138	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02	2,63E-02
LA139	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02	7,27E+02
CE136	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12	6,54E-12
CE138	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03	1,49E-03
CE140	7,41E+02	7,47E+02	7,47E+02	7,47E+02							
CE142	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02	6,33E+02
PR141	6,37E+02	6,50E+02	6,50E+02	6,50E+02							
ND142	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01	1,06E+01
ND143	4,92E+02	4,97E+02	4,97E+02	4,97E+02							
ND144	5,33E+02	6,23E+02	6,23E+02	6,23E+02							
ND145	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02	3,62E+02
ND146	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02	4,03E+02
ND148	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02	2,33E+02
ND150	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02
SM144	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10	2,59E-10
SM147	6,58E+01	1,34E+02	1,39E+02	1,39E+02	1,39E+02						

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
SM148	1,13E+02	1,14E+02	1,14E+02	1,14E+02							
SM149	2,45E+00	2,76E+00	2,76E+00	2,76E+00							
SM150	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02
SM152	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01	8,50E+01
SM154	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01	3,87E+01
EU151	6,59E-02	1,25E+00	2,34E+00	3,36E+00	4,30E+00	5,16E+00	5,97E+00	7,41E+00	8,64E+00	9,69E+00	1,06E+01
EU153	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02	1,03E+02
GD152	1,45E-01	1,50E-01	1,53E-01	1,55E-01	1,56E-01	1,56E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01
GD154	5,43E+00	2,18E+01	2,91E+01	3,23E+01	3,38E+01	3,44E+01	3,47E+01	3,49E+01	3,49E+01	3,50E+01	3,50E+01
GD155	3,25E-01	7,40E+00	9,01E+00	9,37E+00	9,46E+00	9,47E+00	9,48E+00	9,48E+00	9,48E+00	9,48E+00	9,48E+00
GD156	7,64E+01	7,79E+01	7,79E+01	7,79E+01							
GD157	1,92E-01	1,98E-01	1,98E-01	1,98E-01							
GD158	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01	2,37E+01
GD160	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00	1,69E+00
TB159	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00	3,69E+00
DY156	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14	1,96E-14
DY158	1,61E-06	2,64E-06	3,63E-06	4,57E-06	5,47E-06	6,33E-06	7,15E-06	8,68E-06	1,01E-05	1,14E-05	1,25E-05
DY160	4,85E-01	5,66E-01	5,66E-01	5,66E-01							
DY161	6,32E-01	6,35E-01	6,35E-01	6,35E-01							
DY162	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,40E-01
DY163	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01	3,11E-01
DY164	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01	1,24E-01
HO165	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02	8,66E-02
ER162	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15	5,19E-15
ER164	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07	9,91E-07
ER166	2,71E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,71E-02	2,72E-02	2,72E-02	2,72E-02
ER167	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03	1,18E-03
ER168	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03	3,71E-03
ER170	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04	1,96E-04
TM169	2,75E-04	2,79E-04	2,79E-04	2,79E-04							

Isotopenmassen [g] in einem Endlagerbehälter mit 2 SWR MOX-Brennelementen in Abhängigkeit von der Zeit [a]											
Abklingzeit	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
YB168	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12	1,09E-12
YB170	2,04E-04	2,41E-04	2,41E-04	2,41E-04							
YB171	6,97E-05	1,05E-04	1,06E-04	1,06E-04	1,06E-04						
YB172	1,38E-04	1,39E-04	1,39E-04	1,39E-04							
YB173	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06
YB174	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07	3,52E-07
YB176	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13	7,31E-13
LU175	6,15E-09	6,23E-09	6,23E-09	6,23E-09							
LU176	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11	3,59E-11
HF174	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18	2,79E-18
HF176	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10	7,06E-10
HF177	6,25E-11	6,38E-11	6,38E-11	6,38E-11							
HF178	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11	4,11E-11
HF179	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12	3,05E-12
HF180	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13	2,12E-13
TA181	9,33E-16	1,21E-15	1,21E-15	1,21E-15							
W 182	1,68E-17	3,14E-17	3,14E-17	3,14E-17							
W 183	3,44E-17	3,58E-17	3,58E-17	3,58E-17							
W 184	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18	1,17E-18
RE185	1,09E-21	2,03E-21	2,03E-21	2,03E-21							
TL205	1,14E-21	1,31E-21	1,47E-21	1,63E-21	1,80E-21	1,96E-21	2,12E-21	2,45E-21	2,78E-21	3,11E-21	3,43E-21
PB204	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19	1,25E-19
PB205	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16	3,59E-16
PB206	2,33E-11	2,07E-10	4,71E-10	1,13E-09	2,80E-09	6,42E-09	1,33E-08	4,39E-08	1,13E-07	2,43E-07	4,63E-07
PB208	9,47E-07	2,59E-05	6,55E-05	1,04E-04	1,38E-04	1,70E-04	1,98E-04	2,48E-04	2,88E-04	3,21E-04	3,48E-04
PB209	3,45E-14	2,32E-14	2,51E-14	2,78E-14	3,16E-14	3,67E-14	4,34E-14	6,29E-14	9,27E-14	1,35E-13	1,93E-13
BI209	9,21E-11	5,15E-10	9,66E-10	1,46E-09	2,01E-09	2,65E-09	3,39E-09	5,35E-09	8,22E-09	1,24E-08	1,85E-08
TH232	2,86E-05	1,09E-04	1,90E-04	2,74E-04	3,60E-04	4,48E-04	5,38E-04	7,24E-04	9,18E-04	1,12E-03	1,33E-03

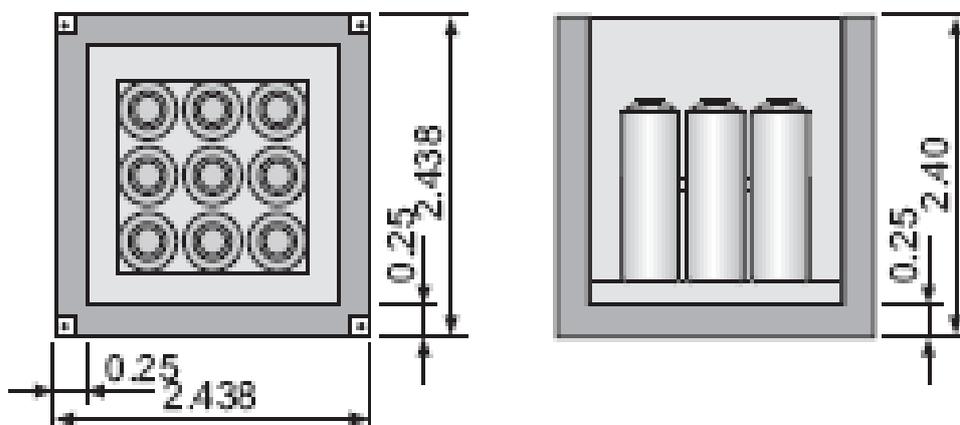
A5: Endlagerbehälter mit einer CSD-V



Anzahl: 3.612 Endlagerbehälter
 Wärmeleistung: ca. 600 W / Behälter (40 a Abklingzeit)

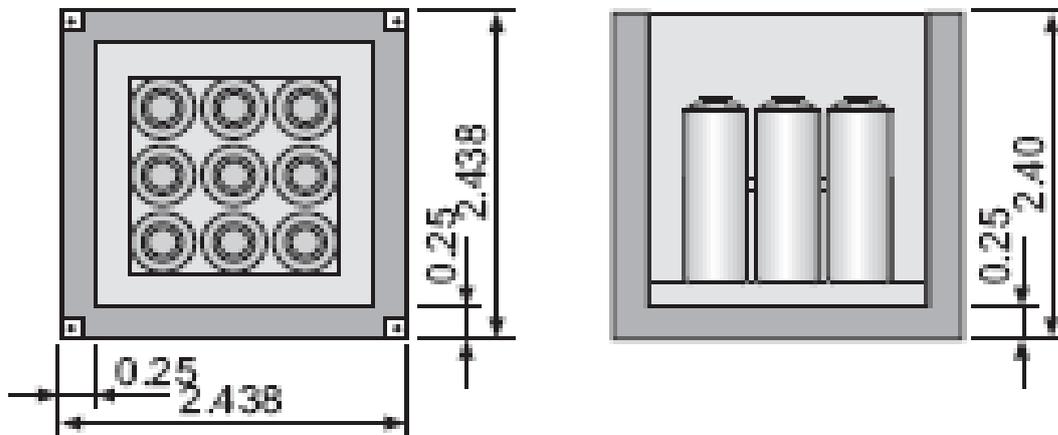
Radionuklidinventar EL-Behälter mit 1 CSD-V			
Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]
H-3	0,00E+00	Th-229	0,00E+00
C-14	7,29E+07	Th-230	2,99E+06
Cl-36	0,00E+00	Th-232	0,00E+00
Co-60	1,00E+12	Pa-231	1,00E+06
Ni-59	3,21E+09	U-233	0,00E+00
Ni-63	2,20E+11	U-234	7,91E+07
Se-79	1,90E+10	U-235	1,70E+06
Sr-90	3,40E+15	U-236	0,00E+00
Zr-93	1,50E+11	U-238	2,40E+07
Nb-93m	1,10E+07	Np-237	1,60E+10
Nb-94	6,31E+08	Pu-238	1,00E+12
Mo-93	1,10E+07	Pu-239	1,20E+11
Tc-99	7,10E+11	Pu-240	1,80E+11
Sn-126	2,91E+10	Pu-241	4,11E+13
I-129	4,19E+06	Pu-242	6,39E+08
Cs-135	7,61E+10	Am-241	4,70E+13
Cs-137	4,81E+15	Am-242m	3,59E+11
Sm-151	1,70E+13	Am-243	1,00E+12
Pb-210	0,00E+00	Cm-243	7,61E+11
Ra-226	0,00E+00	Cm-244	0,00E+00
Ac-227	1,00E+06	Cm-245	9,60E+13
Ra-228	0,00E+00	Gesamt	8,40E+15

A6: Endlagerbehälter mit neun CSD-C



Radionuklidinventar EL-Behälter mit 9 CSD-C							
<i>Nuklid</i>	<i>[Bq]</i>	<i>Nuklid</i>	<i>[Bq]</i>	<i>Nuklid</i>	<i>[Bq]</i>	<i>Nuklid</i>	<i>[Bq]</i>
<i>H-3</i>	1,35E+14	<i>Te-125m</i>	5,31E+10	<i>Po-214</i>	3,15E+04	<i>U-235</i>	1,98E+08
<i>Be-10</i>	6,21E+05	<i>Sb-126</i>	1,17E+08	<i>Po-215</i>	6,39E+04	<i>U-235M</i>	2,79E+12
<i>C-14</i>	3,87E+11	<i>I-129</i>	3,87E+09	<i>Po-216</i>	4,23E+07	<i>U-236</i>	2,52E+09
<i>Cl-36</i>	1,17E+09	<i>Cs-134</i>	2,25E+09	<i>Po-218</i>	3,15E+04	<i>U-237</i>	2,79E+09
<i>Mn-54</i>	7,56E+01	<i>Cs-135</i>	1,17E+10	<i>At-217</i>	8,28E+02	<i>Np-237</i>	1,35E+09
<i>Fe-55</i>	8,28E+11	<i>Cs-137</i>	2,52E+14	<i>Rn-219</i>	6,39E+04	<i>U-238</i>	2,79E+09
<i>Co-60</i>	6,66E+13	<i>Ba-137m</i>	2,34E+14	<i>Rn-220</i>	4,23E+07	<i>Np-238</i>	1,53E+08
<i>Ni-59</i>	9,00E+12	<i>Pm-147</i>	1,89E+10	<i>Rn-222</i>	3,15E+04	<i>Pu-238</i>	1,71E+13
<i>Ni-63</i>	1,26E+15	<i>Sm-147</i>	7,56E+03	<i>Fr-221</i>	8,28E+02	<i>Np-239</i>	7,65E+10
<i>Se-79</i>	1,17E+08	<i>Sm-151</i>	5,94E+12	<i>Fr-223</i>	8,91E+02	<i>Pu-239</i>	2,79E+12
<i>Kr-85</i>	6,48E+12	<i>Eu-152</i>	1,98E+09	<i>Ra-223</i>	6,39E+04	<i>Pu-240</i>	3,78E+12
<i>Sr-90</i>	2,16E+14	<i>Eu-154</i>	1,08E+12	<i>Ra-224</i>	4,23E+07	<i>Pu-241</i>	1,17E+14
<i>Y-90</i>	2,16E+14	<i>Eu-155</i>	4,59E+10	<i>Ra-225</i>	8,28E+02	<i>Am-241</i>	2,61E+13
<i>Zr-93</i>	3,87E+11	<i>Ho-166m</i>	9,90E+06	<i>Ac-225</i>	8,28E+02	<i>Pu-242</i>	1,44E+10
<i>Nb-93m</i>	3,33E+11	<i>Tl-207</i>	6,39E+04	<i>Ra-226</i>	3,15E+04	<i>Am-243</i>	7,65E+10
<i>Nb-94</i>	1,62E+12	<i>Tl-208</i>	1,53E+07	<i>Ac-227</i>	6,48E+04	<i>Am-242</i>	3,15E+10
<i>Mo-93</i>	3,69E+10	<i>Pb-209</i>	8,28E+02	<i>Th-227</i>	6,39E+04	<i>Cm-242</i>	2,61E+10
<i>Tc-99</i>	1,62E+11	<i>Pb-210</i>	9,00E+03	<i>Th-228</i>	4,23E+07	<i>Am-242m</i>	3,15E+10
<i>Ru-106</i>	3,87E+04	<i>Bi-210</i>	9,00E+03	<i>Th-229</i>	8,28E+02	<i>Cm-245</i>	2,52E+08
<i>Rh-106</i>	3,87E+04	<i>Pb-211</i>	6,39E+04	<i>Th-230</i>	4,05E+06	<i>Cm-246</i>	4,86E+07
<i>Pd-107</i>	2,43E+09	<i>Bi-211</i>	6,39E+04	<i>Th-231</i>	1,98E+08	<i>Cm-243</i>	1,71E+10
<i>Ag-108</i>	6,39E+06	<i>Pb-212</i>	4,23E+07	<i>Pa-231</i>	1,53E+05	<i>Cm-244</i>	4,32E+12
<i>Ag-108m</i>	7,38E+07	<i>Bi-212</i>	4,23E+07	<i>Th-234</i>	2,79E+09	<i>Summe H7</i>	5,49E+13
<i>Sn-119m</i>	6,84E+01	<i>Pb-214</i>	3,15E+04	<i>Pa-234</i>	9,00E+06	<i>Summe H</i>	2,52E+15
<i>Sn-121</i>	3,60E+11	<i>Bi-214</i>	3,15E+04	<i>Pa-234m</i>	2,79E+09	<i>Total</i>	2,61E+15
<i>Sn-121m</i>	4,59E+11	<i>Po-210</i>	8,91E+03	<i>U-232</i>	4,05E+07		
<i>Sn-126</i>	8,19E+08	<i>Po-212</i>	2,70E+07	<i>Pa-233</i>	1,35E+09		
<i>Sb-126m</i>	8,19E+08	<i>Bi-213</i>	8,28E+02	<i>U-233</i>	3,51E+05		
<i>Sb-125</i>	2,16E+11	<i>Po-213</i>	8,10E+02	<i>U-234</i>	1,26E+10		

A7: Endlagerbehälter mit neun CSD-B



Anzahl: 69 Endlagerbehälter
 Wärmeleistung: ca. 180 W / Behälter (40 a Abklingzeit)

Radionuklidinventar EL-Behälter mit 9 CSD-B			
Nuklid	Aktivität [Bq]	Nuklid	Aktivität [Bq]
H-3	4,45E+11	Eu-154	1,33E+12
Co-60	4,45E+10	Eu-155	4,45E+11
Sr-90	4,45E+12	U-235	2,31E+04
Y-90	4,45E+12	U-238	2,31E+04
Tc-99	4,45E+09	Pu-238	5,19E+11
Ru-106	5,56E+13	Pu-239	5,54E+10
Rh-106	5,56E+13	Pu-240	6,93E+10
Sb-125	2,22E+12	Pu-241	3,46E+13
I-129	4,45E+09	Am-241	2,31E+10
Cs-134	2,22E+12	Cm-242	8,08E+09
Cs-137	4,45E+12	Cm-243	4,04E+09
Ba-137m	4,45E+12	Cm-244	6,87E+10
Ce-144	8,90E+11	others β/γ	4,45E+11
Pr-144	8,90E+11	others α	2,31E+09
Pm-127	1,33E+12		

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de