



Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (Agneb)

Entsorgung der MIF-Abfälle nach dem «Ende des Einlagerungsbetriebs» der geplanten geologischen Tiefenlager

Bericht der Untergruppe

November 2019

Untergruppe:

Raphaël Stroude, Nicolas Stritt, Bundesamt für Gesundheit (Vorsitz)
Stefan Theis, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)
Harald Maxeiner, Tim Vietor, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra)
Peter Allenspach, Joachim Müth, Paul Scherrer Institut (PSI)
José Rodriguez, Bundesamt für Energie (BFE)

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Mandat	4
3.	Zielsetzung und Rahmenbedingungen des Auftrags	5
3.1.	Notwendigkeit der Analyse.....	5
3.2.	Rahmenbedingungen.....	5
4.	Mengenprognose	6
4.1.	Paul Scherrer Institut (PSI)	7
4.2.	CERN	9
4.3.	Abfälle aus den Sammelaktionen (gesammelte Abfälle)	11
4.4.	NORM-Abfälle.....	13
4.5.	Diskussion der Inventare.....	14
4.6.	Zusammenfassung der Abfallvolumina und Abfallgebinde	14
4.7.	Abfallvolumina in der Zwischenlagerung	15
5.	Entsorgungsoptionen	16
5.1.	Konditionierung und Zwischenlagerung	16
5.2.	Entsorgungsoptionen in der Schweiz	16
5.3.	Multinationale Lösungen	19
5.4.	Diskussion der Optionen	20
6.	Schlussfolgerungen	22

1. Einleitung

Die Rechte und Pflichten rund um die Entsorgung der radioaktiven Abfälle beruhen auf dem Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (KEG; SR 732.1) und dem Strahlenschutzgesetz vom 22. März 1991 (StSG, SR 814.50) sowie auf den dazugehörigen Verordnungen.

Für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle gilt das Verursacherprinzip: Die Betreiber von Kernanlagen sind verpflichtet, ihre radioaktiven Abfälle auf eigene Kosten sicher zu entsorgen (KEG Art. 31, Abs. 1). Die Entsorgungspflicht ist erfüllt, wenn die Abfälle in ein geologisches Tiefenlager verbracht worden und die finanziellen Mittel für die Beobachtungsphase sowie den allfälligen Verschluss sichergestellt sind (KEG Art. 31, Abs. 2 Bst. a). Für radioaktive Abfälle, die nicht als Folge der Kernenergienutzung entstehen, d. h. Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF-Abfälle), ist der Bund zuständig, wobei auch hier die Kosten durch die Verursacher getragen werden (Art. 27 StSG).

Die Betreiber der schweizerischen Kernkraftwerke haben zusammen mit dem Bund 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gegründet und diese mit der Entsorgung beauftragt. Das Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen¹ (EP16) beinhaltet neben den Abfallarten, -mengen und Inventaren auch den Realisierungsplan für geologische Tiefenlager bis zum Verschluss der Lager nach einer Beobachtungsphase von 50 Jahren. Aufgrund der heutigen Situation werden in der Schweiz in Zukunft keine neuen Kernkraftwerke gebaut werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass Abfälle aus dem MIF-Bereich auch nach Ende der Einlagerungsphase (2065) oder nach dem Verschluss der Lager (2115) anfallen werden. Somit wird der Bund nach heutiger Gesetzeslage als einziger Entsorgungspflichtiger übrigbleiben. Daher stellt sich die Frage: Welche Mengen und Arten von Abfällen werden anfallen und wie sollen sie entsorgt werden?

Nach aktueller Zeitplanung werden das oder die Rahmenbewilligungsgesuche etwa 2024 durch die Nagra eingereicht. Bis dann müssen die maximalen Lagerkapazitäten und Kategorien des Abfallguts festgelegt sein. Zu diesem Zeitpunkt sollte seitens Bund eine Planung bestehen, wie mit den MIF-Abfällen nach Ende des Einlagerungsbetriebs umgegangen wird.

Um dieser Frage nachzugehen, hat die Agneb ein Mandat verabschiedet, mit dem verschiedene Varianten untersucht werden sollen (siehe Kapitel 2). Neben technischen sind auch Aspekte organisatorischer und finanzieller Art zu betrachten.

Im aktuellen Entsorgungsprogramm (EP16) geht die Nagra davon aus, dass sämtliche Betriebs- und Rückbauabfälle aus den Kernanlagen des PSI und ein Teil der Betriebs- und Rückbauabfälle aus den Beschleunigeranlagen des PSI-West während der Betriebszeit des geologischen Tiefenlagers (gTL) anfallen und dort eingelagert werden. Ebenfalls berücksichtigt für die Einlagerung im Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA-Lager) sind Betriebs- und Rückbauabfälle aus dem CERN. Das ENSI kommt in seinem Gutachten zum EP16 zum Schluss, dass insbesondere die letztgenannten Mengen im EP21 entsprechend den laufend konkretisierten Planungen der Forschungsprogramme von PSI und CERN zu überarbeiten sind. Derzeit ist noch nicht abschliessend festgelegt, welche der Grossforschungsanlagen, die im Betrieb bzw. bei ihrem Rückbau radioaktive Abfälle erzeugen, am Ende der Sammelperiode des gTL noch nicht zurückgebaut sein werden. Diese Tatsache wird im vorliegenden Bericht durch die Betrachtung verschiedener Mengenvarianten abgebildet.

¹ NTB 16-01

2. Mandat

Die Agneb hat am 22. Juni 2016 eine Untergruppe (UG) mit dem folgenden Mandat eingesetzt:

«Aufgrund der noch unbestimmten Betriebsdauer vieler grosser Forschungsanlagen wie die des CERN oder des PSI sowie der unbekanntem zukünftigen Anwendungen von Abfall produzierenden Technologien in der Medizin und der Industrie stellt sich die Frage nach dem Umgang mit MIF-Abfällen nach der Einlagerung der Abfälle aus der Kernenergie und nach der entsprechenden Sammelperiode für MIF-Abfälle resp. späteren Verschluss der geplanten geologischen Tiefenlager.

Die langfristige Entsorgung der MIF-Abfälle soll nun durch eine Untergruppe der Agneb untersucht werden. Diese soll eine vertiefte Analyse der Problemstellung und möglicher Lösungsansätze vornehmen und einen Bericht zuhanden der Agneb verfassen.

Dabei sind unter anderen folgende Punkte zu klären:

- *Herkunft, Zeithorizont und zu erwartende Mengen radioaktiver Abfall aus Medizin, Industrie und Forschung.*
- *Konditionierung und Zwischenlagerung dieser Abfälle.*
- *Vor- und Nachteile sowie technische Möglichkeiten und finanzielle Konsequenzen*
 - *einer verlängerten Offenhaltung eines SMA-Lagers;*
 - *einer Einlagerung am Ende der Beobachtungsphase eines SMA-Lagers vor dem definitiven Verschluss oder*
 - *eines weiteren SMA-Lagers.*
- *Mögliche Alternativen zum geologischen Tiefenlager für die noch zu erwartenden Mengen an radioaktiven MIF-Abfällen nach dem Ende des Einlagerungsbetriebs in der Schweiz.»*

3. Zielsetzung und Rahmenbedingungen des Auftrags

3.1. Notwendigkeit der Analyse

Die Abfallinventare für die Zeit nach 2065 sind zwar mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet, trotzdem können sie wertvolle Grundlagen zum Ausmass der Problematik sowie zur Diskussion von Vor- und Nachteilen gewisser Lösungsansätze liefern. Insofern ist es zur Inventarbildung wichtig, die Grössenordnungen mit Bandbreiten zu kennen. Es ist also relevant, welche Volumen im besten und welche im schlechtesten Fall anfallen werden (einzelne oder tausende m³) und ob es sich dabei eher um schwach- oder eher um mittelaktive Abfälle handelt. Je nach Ergebnis sind verschiedene Optionen möglich, die es zu bewerten gilt.

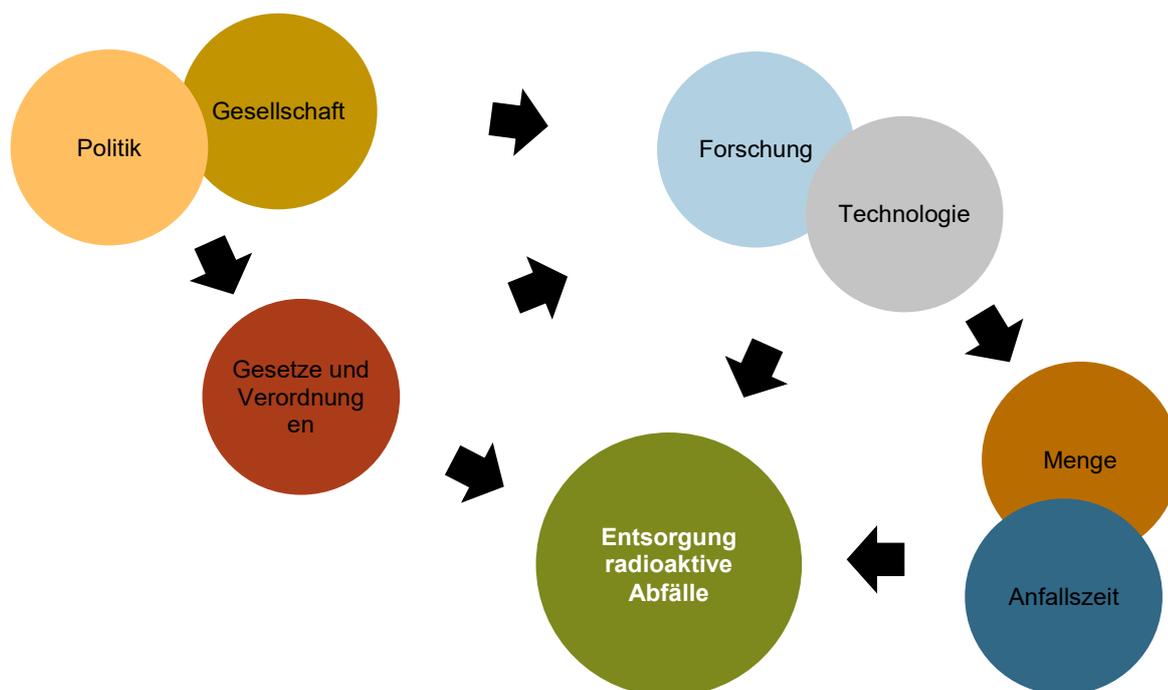
In diesem Sinne sind die in diesem Bericht enthaltenen Zahlen nicht als Planungsgrundlagen zu verstehen, sondern als Denkansatz für die Entwicklung möglicher Handlungsstrategien.

3.2. Rahmenbedingungen

Die möglichen Entsorgungswege für radioaktive Abfälle hängen von vielen Elementen ab. Untenstehende Grafik 1 veranschaulicht die Rahmenbedingungen bei der Entsorgung. Wie in der Einleitung erläutert, geht dieser Bericht von der Annahme aus, dass in der Schweiz künftig keine neuen Kernkraftwerke gebaut werden und er basiert auf dem Zeitplan gemäss EP16, mit einem Verschluss des SMA-Lagers im Jahr 2115.

Die möglichen Entsorgungswege für radioaktive Abfälle (nach Verschluss der jetzt geplanten Lager) hängen primär von folgenden Faktoren ab: den zu entsorgenden Mengen, deren Eigenschaften und zeitlichem Anfall, aber auch von den zur Verfügung stehenden Technologien. Diese Parameter werden zu einem grossen Teil durch die betriebene Forschung beeinflusst (sowohl in der Rolle als Abfallproduzent als auch als Lösungsentwickler).

Auf die Forschung selbst wirken verschiedene Faktoren ein. Einerseits üben Gesellschaft und Politik einen starken Einfluss aus, zum Beispiel bei der Forschung für neue Energiesysteme und Antriebstechniken oder bei der Suche nach neuen Therapieeinrichtungen (vergleiche z. B. Protonentherapie am PSI). Solche Entwicklungen können einerseits die Menge radioaktiver Abfälle, aber auch deren Eigenschaften stark beeinflussen. Andererseits bestimmen auch Gesetze und Verordnungen (wie z. B. die Möglichkeit zur Materialfreimessung) die Forschung nach alternativen Entsorgungswegen bzw. Technologien. Diese vielseitigen Wechselwirkungen machen eine Prognose über einen so langen Zeitraum schwierig.



Graphik 1: Rahmenbedingungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle

4. Mengenprognose

Die aufgeführten Inventare beruhen auf folgenden Annahmen:

- Aktuelle geltende rechtliche Grundlagen (Befreiungsgrenzen etc.)
- Aktuelle Planung am PSI und CERN
- Entwicklungsprognosen (neue Technologien, Einrichtungen)

Grosse Änderungen in der Planung der Grossforschungsanlagen oder eine Änderung der Befreiungsgrenzen (Grenzwerte für die Inaktivfreigabe nach StSV) hätten Auswirkungen auf die Abfallmengen, die zurzeit nicht abschätzbar wären.

Für die Prognosen der anfallenden Volumina radioaktiven Abfalls ist zwischen Rohabfall, konditioniertem Abfall und (endlagergerecht) verpacktem Abfall zu unterscheiden:

- **Rohabfall:** Abfall zum Zeitpunkt seiner Entstehung; bei Forschungsanlagen primär metallische Komponenten und Beton; in sonstigen Bereichen, aus den Sammelaktionen, sind es z. B. in Abfallsäcken abgelieferte Abfälle, einzelne Objekte oder Quellen und kontaminiertes Material.
- **Konditionierter Abfall:** Konditionierter Abfall (Volumen) nach Behandlung bzw. Konditionierung des Rohabfalls, i. A. Zementierung in 200-l-Fässer oder Betoncontainer. Diese Abfallgebilde werden bis zur Einbringung in ein Tiefenlager zwischengelagert.
- **(endlagergerecht) verpackter Abfall:** Konditionierte Abfallgebilde (konditionierter Abfall, z. B. zementierte 200-l-Fässer) werden gemäss heutigem Konzept für die Tiefenlagerung in grössere Betoncontainer (Endlagerbehälter) umverpackt. Dadurch erhöht sich das effektive Endlagervolumen gegenüber dem Zwischenlagervolumen. Die bereits in Betoncontainern konditionierten Abfälle werden direkt im Tiefenlager eingelagert und nicht zusätzlich verpackt. Somit entspricht hier das Zwischenlagervolumen dem Endlagervolumen.

In den folgenden Kapiteln werden die konditionierten und verpackten Abfallvolumina in Abhängigkeit von der Abschätzung betrachtet. In der finalen Zusammenfassung geht es nur noch um die in ein Tiefenlager einzubringenden, verpackten Abfallvolumina, also um das im Lager benötigte Volumen.

Für alle Abfallproduzenten wurden jeweils drei Szenarien entwickelt (*Tief*, *Referenz*, *Hoch*). Alle Szenarien stellen eine mögliche Entwicklung der Abfallproduktion unter Annahme mehr oder weniger stabiler Rahmenbedingungen dar. Extreme Szenarien (Wegfall der Freimessung, Entwicklung unvorhergesehener, abfallproduzierender Technologien usw.) werden nicht untersucht. Das *Referenz*-Szenario entspricht, aus Sicht der Arbeitsgruppe, dem wahrscheinlichsten Szenario (best guess). Das Szenario *Tief* entspricht einer reduzierten Version davon, bei der im Allgemeinen weniger Abfall produziert wird. Das Szenario *Hoch* berücksichtigt Fälle wie z. B. die Nicht-Entsorgung gewisser Abfälle im geplanten Tiefenlager oder eine starke Entwicklung bereits jetzt vorhersehbarer abfallproduzierender Technologien.

4.1. Paul Scherrer Institut (PSI)

Beim PSI fallen radioaktive Abfälle aus den Kernanlagen des Bundes sowie aus den Beschleunigeranlagen an. Sie entstehen während des Betriebs, aber auch beim Rückbau der Anlagen. Alle genannten Abfälle sind chemisch und physikalisch unterschiedlich, so dass vor ihrer Konditionierung oft eine Triage und Vorbehandlungen notwendig sind. Zudem sind unterschiedliche Konditionierungs- und Verpackungskonzepte erforderlich.

4.1.1. Kernanlagen des Bundes

Zurzeit befinden sich bis auf das Hotlabor und die Sammelstelle des Bundes (Anlagen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle) alle Kernanlagen des PSI im bzw. vor dem Rückbau. Der Betrieb der Kernanlagen am PSI wird auslaufen, die radioaktiven Abfälle werden in das geologische Tiefenlager überführt, einschliesslich der Abfälle des Hotlabors. Einzig die Bundessammelstelle oder ein kleiner Teil davon wird, falls weiterhin benötigt, fortbestehen. Folglich werden nach Schliessung des geologischen Tiefenlagers keine radioaktiven Abfälle aus dem Betrieb oder der Stilllegung der Kernanlagen mehr anfallen. Es ist davon auszugehen, dass die übriggebliebenen Einrichtungen der Bundessammelstelle, falls überhaupt nötig, lokal dekontaminiert werden können und nicht als radioaktiver Abfall entsorgt werden müssen. Analoge Prognosen gelten für die derzeit noch in Betrieb befindlichen Kernanlagen der EPFL.

Somit wird für die Prognose für alle Szenarien ein Wert von 0 m³/a eingesetzt.

4.1.2. Stilllegungsabfälle aus Beschleunigeranlagen/Elektronenbeschleunigern am PSI (nicht Kernanlagen)

Die Protonenbeschleunigeranlagen des PSI (HIPA-Anlagen) werden noch bis Anfang der 40er-Jahre in Betrieb bleiben. Das PSI sieht vor, dass diese Anlagen vor der Schliessung des geologischen Tiefenlagers zurückgebaut, konditioniert und abgeliefert sein werden. Somit wird nach der Schliessung des geologischen Tiefenlagers kein weiterer radioaktiver Abfall aus dem Betrieb der HIPA-Anlage oder der Stilllegung anfallen.

Aus der Stilllegung der Elektronenbeschleuniger wird wahrscheinlich auch nach dem Verschluss des geologischen Tiefenlagers radioaktiver Abfall anfallen: Das geschätzte Abfallvolumen aus dem Rückbau von SwissFEL² nach 40 Jahren Betrieb wird für eine Strahllinie maximal mit 3 m³ (17 t Kupfer, Schwerbeton, Bundeseisen) angegeben. Es sind zwei Strahllinien realisiert, maximal sind drei Strahllinien möglich. Somit wird maximal eine einmalige Menge in Höhe von ca. 9 m³ an radioaktivem Abfall aus dem Stilllegungsabfall von SwissFEL anfallen. Bei der Swiss Light Source (SLS) wird kein Stilllegungsabfall angenommen. Für die Stilllegung des Medizinbeschleunigers und dessen Strahllinien (Proscan, Gantry) geht man von einem Abfallvolumen von 36 m³ aus³.

Aus dem allfälligen Rückbau von zukünftigen (z. Z. noch nicht geplanten) Beschleunigern können ebenfalls radioaktive Abfälle anfallen. Dies könnten entweder kleine Protonenbeschleuniger oder Elektronenbeschleuniger mit wenig Abfallvolumen sein. Diese Abfälle werden im Szenario *Hoch* mit 36 m³ (ab 60 Jahren) berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den gesammelten Abfällen (s. 4.3.5) wird davon ausgegangen, dass die Abfälle aus den Nichtkernanlagen des PSI direkt in Betoncontainern vom Typ KC-T12 mit einem Volumen von 4,5 m³ konditioniert werden, die für die Endlagerung nicht zusatzverpackt werden. Somit entsprechen die obigen Angaben bereits dem endlagergerecht verpackten Volumen.

Als mögliche Szenarien für die PSI-Stilllegungsabfälle aus Nichtkernanlagen werden folgende Zahlen vorgeschlagen (verpacktes Volumen):

² Siehe Bericht PSI-FEL-KD85-001-1 vom 14.1.2015

³ Siehe Bericht AN 19-15-27

Tabelle 4.1: verpackte Volumina, Stilllegungsabfall aus Nichtkernanlagen des PSI [m³]

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	10	45	55
2065 bis 2125	10	45	90
2065 bis 2155	10	45	90

Diese Volumina können in **Zahlen von KC-T12-Containern** (gerundet) konvertiert werden (Volumen KC-T12: 4,5 m³):

Tabelle 4.2: Anzahl KC-T12-Container, Stilllegungsabfall aus Nichtkernanlagen des PSI

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	3	10	13
2065 bis 2125	3	10	21
2065 bis 2155	3	10	21

4.1.3. Betriebsabfälle aus Beschleunigeranlagen/Elektronenbeschleunigern am PSI (nicht Kernanlagen)

Aus dem laufenden Betrieb der Strahllinien der am PSI betriebenen SLS und dem SwissFEL werden kaum radioaktive Abfälle erwartet. Bei zukünftigen kleinen Protonenbeschleunigern (z. B. Medizin, z. Z. keine in Planung) könnten kleinere Mengen anfallen. Daher folgende Annahme: pro Jahr, minimal 0 m³, als Referenzfall 0,5 m³ und maximal 1 m³.

Als mögliche Szenarien für den radioaktiven Abfall aus dem Betrieb der laufenden und allenfalls zukünftigen Beschleuniger des PSI werden folgende Zahlen (direkt in Betoncontainer KC-T12 verpacktes Volumen) vorgeschlagen:

Tabelle 4.3: verpackte Volumina, Betriebsabfälle aus Beschleunigeranlagen/Elektronenbeschleunigern am PSI [m³]

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	0	15	30
2065 bis 2125	0	30	60
2065 bis 2155	0	45	90

Diese Volumina können in **Zahlen von KC-T12-Containern** (gerundet) konvertiert werden (Volumen KC-T12: 4,5 m³):

Tabelle 4.4: Anzahl KC-T12-Container, Betriebsabfälle aus Beschleunigeranlagen/Elektronenbeschleunigern am PSI

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	0	4	7
2065 bis 2125	0	7	14
2065 bis 2155	0	10	20

4.2. CERN

Die in der Schweiz zu entsorgenden CERN-Abfälle gelten als gesammelte Abfälle. Diese werden in diesem Bericht gesondert aufgeführt, da einerseits die Mengen im Vergleich zu den sonstigen Lieferanten der Sammelaktion grösser sind, andererseits, weil detailliertere Szenarien angenommen werden können.

Die in der Schweiz zu entsorgenden CERN-Abfälle werden im Rahmen eines Drei-Parteien- Abkommens zwischen dem CERN und seinen Sitzstaaten, der Schweiz und Frankreich, bestimmt. In diesem Rahmen hat das CERN erste Überlegungen zur Szenarien-Bildung sowie zu möglichen Inventarzahlen bis 2100 geliefert.

Das vom CERN vorgeschlagene *Referenzszenario* postuliert u. a. den Weiterbetrieb der CERN-Einrichtungen sowie deren Erweiterung auch nach 2060, so dass keine Stilllegungsabfälle im Inventar für die Zeit nach 2060 enthalten sind. Zudem basiert dieses Szenario auf einer Weiterführung des heute gültigen Drei-Parteien-Abkommens zwischen dem CERN, Frankreich und der Schweiz zur Verteilung der zu entsorgenden Abfälle.

Die gelieferten Zahlen beruhen auf konservativen Annahmen und vor allem einer engen Auslegung des Drei-Parteien-Abkommens. Es ist wahrscheinlich, dass zukünftige Schätzungen sehr viel geringere Mengen oder sogar gar keinen Abfall mehr für die Schweiz prognostizieren werden. Bestimmend dafür wird die Entwicklung der Forschungsprogramme am CERN sein, aber vor allem auch die Verteilung der radioaktiven Abfälle zwischen Frankreich und der Schweiz.

Insgesamt gibt das CERN für die Periode 2060–2100 (also für einen Zeitraum von 40 Jahren) einen Wert von 650 m^3 für das in die Schweiz als radioaktiver Abfall abzuliefernde Volumen an. Da die Abfallproduktion aus mehr oder weniger kontinuierlich anfallenden Quellen stammt, wird die Abfallproduktion für 30 Jahre für das *Referenzszenario* zu $650 \times 30 \text{ a} / 40 \text{ a} =$ (gerundet) 500 m^3 angenommen. Gemäss dem CERN-Konzept handelt es sich um das Volumen von Abfällen, die in Standard 1 m^3 -Gitterboxen gelagert werden, d. h. die 500 m^3 entsprechen 500 Stk. 1 m^3 -Gitterboxen. Für die Endlagerung müssen auch diese Abfälle in Betoncontainer verpackt werden. Es werden hier die $4,5 \text{ m}^3$ KC-T12-Container mit einem verfügbaren Innen-/Verpackungsvolumen von ca. $2,65 \text{ m}^3$ zu Grunde gelegt. Es ist davon auszugehen, dass der Inhalt von ca. 2,2–2,3 Gitterboxen in einen KC-T12-Container gefüllt werden kann. Somit erhöht sich das endlagergerecht verpackte Volumen gegenüber dem Gitterbox-Volumen um einen Faktor $4,5/2,25 = 2$.

Somit kann die Abfallproduktion für 30 Jahre für das *Referenzszenario* auf 500 m^3 (Gitterboxen) bzw. $500 \times 2 = 1000 \text{ m}^3$ verpacktes Volumen geschätzt werden. Für das Szenario *Tief* kann postuliert werden, dass die grössten Anlagen des CERN bis 2060 ausser Betrieb genommen und rückgebaut werden. Das CERN würde dann nur noch einige kleinere Forschungsanlagen betreiben. Nimmt man das PSI als Referenz, kann der gleiche Wert für 30 Jahre angenommen werden, nämlich 15 m^3 bei 30 Jahren (hier wieder in Gitterboxen) bzw. $15 \times 2 = 30 \text{ m}^3$ verpacktes Volumen. Für das Szenario *Hoch* kann man, analog PSI, eine 50 %-ige Zunahme der Referenzvolumen annehmen, also 750 m^3 bei 30 Jahren (Gitterboxen) bzw. $750 \times 2 = 1500 \text{ m}^3$ verpacktes Volumen.

Als mögliche Szenarien für die CERN-Abfälle werden folgende Zahlen für die Lagerung in **Gitterboxen** vorgeschlagen:

Tabelle 4.5: in Gitterboxen gelagerte Volumina, Abfälle des CERN [m³]

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	15	500	750
2065 bis 2125	30	1000	1500
2065 bis 2155	45	1500	2250

Für die **endlageregerecht verpackten Abfälle** (Faktor 2 zu den Gitterboxen) ergeben sich folgende Volumina für die CERN-Abfälle:

Tabelle 4.6: verpackte Volumina, Abfälle des CERN [m³]

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	30	1000	1500
2065 bis 2125	60	2000	3000
2065 bis 2155	90	3000	4500

Diese Volumina können in **Zahlen von KC-T12-Containern** (gerundet) konvertiert werden (Volumen KC-T12: 4,5 m³):

Tabelle 4.7: Anzahl KC-T12-Container, Abfälle des CERN

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	7	223	334
2065 bis 2125	14	445	667
2065 bis 2155	20	667	1000

4.3. Abfälle aus den Sammelaktionen (gesammelte Abfälle)

Die im Rahmen der jährlichen Sammelaktionen des Bundes gesammelten radioaktiven Abfälle stammen aus der Medizin, Industrie und Forschung und werden an das PSI zur Konditionierung und Zwischenlagerung abgeliefert. Sie stellen gegenwärtig nur einen kleinen Teil (5–10 %) der MIF Abfälle dar. Ungefähr 2–3 m³ pro Jahr werden an das PSI abgeliefert. Im Unterschied zu den Abfällen aus den Kernkraftwerken werden solche Abfälle auch nach dem Verschluss des heute geplanten Tiefenlagers anfallen. Zahlen zur abgelieferten Abfallmenge liegen seit den Siebzigerjahren vor und sind jährlich grossen Schwankungen unterworfen. Prognosen für die in Zukunft abgelieferten Volumina sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Auf Grund der nachfolgenden Argumentation wird aber zumindest eine Grössenordnung der zu erwartenden Volumina für die einzelnen Bereiche (Medizin, Industrie, Forschung) geschätzt.

4.3.1. Medizinische Abfälle

Aus der Medizin werden heute kaum radioaktive Abfälle abgeliefert. In der Nuklearmedizin werden hauptsächlich kurzlebige Nuklide eingesetzt, die nach kurzer Zeit inaktiv werden und konventionell entsorgt werden können. Das gleiche gilt für viele Kalibrierungsquellen, wobei sich die Zeit bis zur Freimessung bei diesen Quellen über einige Jahre erstrecken kann. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft aus der Nuklearmedizin keine als radioaktiv zu entsorgenden Abfälle entstehen werden, da die Kurzlebigkeit der eingesetzten Nuklide für die Minimierung der Patientendosen entscheidend ist. Hingegen werden in der Medizin vermehrt Beschleunigeranlagen eingesetzt. In der Strahlentherapie dienen diese zur Bestrahlung von Tumoren. Weiter werden zur Herstellung von Nukliden für die Nuklearmedizin Zyklotrone verwendet. Gewisse Beschleunigerteile werden während des Betriebs der Anlagen aktiviert und müssen zum Teil bei der Ausserbetriebnahme als radioaktive Abfälle entsorgt werden. Bei Elektronenbeschleunigern, wie sie typischerweise in der Strahlentherapie eingesetzt werden, sind die Mengen an anfallenden radioaktiven Abfällen klein (einige Liter). Bei Zyklotronen ist diese Menge grösser und kann bis etwa 1 m³ betragen, wobei zurzeit für den eigentlichen kompletten Rückbau solcher Anlagen nur wenig Erfahrung vorliegt. In der Strahlentherapie werden aktuell immer mehr Protonenbeschleuniger eingesetzt, diese Technologie könnte sich in den nächsten Jahren weiterverbreiten. Diese Anlagen sind etwas grösser und könnten beim Rückbau bis einige m³ radioaktive Abfälle hinterlassen.

4.3.2. Abfälle aus der Industrie

Die Industrie ist momentan die Hauptlieferantin von radioaktiven Abfällen bei den Sammelaktionen des Bundes. Das Nuklid H-3 dominiert die abgelieferten Abfälle hinsichtlich der Aktivität. Einige wenige Firmen verursachen diese Umsätze an abgelieferten Aktivitäten. Aktuell liegen zwar keine klaren Hinweise auf einen Rückgang der Anwendungen vor, es sind jedoch Anstrengungen zur Minimierung und Recyclingversuche im Gange, die die abgelieferten Aktivitäten künftig reduzieren sollten. Andererseits könnte jedoch der Einsatz von Beschleunigern in der Industrie (z. B. für zerstörungsfreie Prüfungen) eine neue Abfallquelle darstellen.

4.3.3. Abfälle aus der Forschung (exklusive PSI und CERN)

Aus der Forschung werden relativ wenig radioaktive Abfälle abgeliefert – abgesehen von den Abfällen aus den Gross-Forschungsanlagen am PSI und CERN, die in diesem Bericht gesondert behandelt werden. Die meisten dieser Abfälle enthalten Nuklide mit relativ kurzen Halbwertszeiten, so dass eine Abklinglagerung mit anschliessender Freimessung Erfolg verspricht. Einige dieser Abfälle enthalten zwar auch längerlebige Nuklide; Optimierungen in den Versuchsprotokollen sowie der Ersatz durch alternative Technologien reduzieren seit einigen Jahren diese Aktivitäten auf ein Minimum. Aktuell gibt es keine Anzeichen, dass in gewissen Bereichen mehr radioaktive Abfälle produziert werden. Für die Zukunft kann ein neues abfallproduzierendes Forschungsgebiet aber nicht vollständig ausgeschlossen werden.

4.3.4. Altlasten

Gegenwärtig erzeugen mit Radium belastete Altlasten sowie militärisches Material einen grossen Teil des Abfallvolumens bei der Sammelaktion. Radium enthaltende Materialien wurden bis in die Sechzigerjahre produziert und verursachen heute noch radioaktive Abfälle. Seit 2015 setzt das BAG den sogenannten «Aktionsplan Radium⁴» um, der v. a. zum Ziel hat, kontaminierte Liegenschaften aus ehemaligen Tätigkeiten mit Radium zu identifizieren und bei Bedarf zu sanieren. Dadurch fallen vermehrt kontaminierte Materialien als Abfall an, was für einige Jahre eine Spitze in der Abfallproduktion erzeugen könnte. Durch den Aktionsplan soll jedoch die Problematik der Radiumaltlasten relativ rasch unter Kontrolle gebracht werden. Die abgelieferte Menge an Radiumabfällen (sowie auch sonstige Altlasten) sollte dementsprechend stetig abnehmen.

4.3.5. Fazit für die Abfälle aus den Sammelaktionen

Das jährlich in den Sammelaktionen abgelieferte Volumen variiert in den zehn zurückliegenden Jahren⁵ zwischen 1,5 und 4,4 m³. Wegen eines eventuell erhöhten Einsatzes von Beschleunigertechnologie (s. 4.1.1) könnte aus der Medizin ein leicht erhöhtes Volumen abgelieferter Abfälle anfallen (das zu erwartende Volumen hält sich jedoch im Rahmen, da Beschleunigeranlagen erst nach jahrelangem Einsatz ersetzt oder entsorgt werden, solche Anlagen sehr teuer sind und entsprechend nur in grösseren Spitälern installiert werden). Als Rechengrundlage werden fünf Zyklotrone in der Schweiz und 1 m³ Abfall alle 20 Jahre pro Beschleuniger angenommen. Somit resultiert weniger als 1 m³ Abfall pro Jahr für alle Zyklotrone. Diese tendenzielle Steigerung wird durch den tendenziellen Rückgang der verbleibenden Altlasten und die generell rückläufigen Tendenzen von Abfällen aus Industrie und Forschung kompensiert. Basierend auf diesen Betrachtungen schlägt die UG vor, für das (mittlere) *Referenzszenario* einen jährlichen Anfall von 2,5 m³ für die MIF-Sammelaktionen ab 2065 anzunehmen. Es handelt sich dabei um das «konditionierte Volumen» dieser Abfälle in 200-l-Fässern. Bei einem typischen Fassvolumen von 0,215 m³ entspricht dies einer mittleren Jahresproduktion von (gerundet) zwölf 200-l-Fässern.

Die vorgeschlagenen 2,5 m³/a werden als *Referenzwert/Referenzszenario* angenommen. Bei 30 Jahren Abfallproduktion nach dem Verschluss des gTL ergeben sich dann 2,5 m³/a x 30 Jahre = 75 m³. Beim Szenario *Tief* wird ein Stopp der Abfallproduktion angenommen. Dabei würden noch sämtliche im Umlauf befindlichen radioaktiven Materialien (Quellen im Einsatz, Altlasten ...) als radioaktive Abfälle anfallen. Der niedrigste Wert der letzten Sammelaktionen (1,5 m³/a) wird als Grundlage für die Berechnung herangezogen, bei 30 Jahren also 1,5 m³/a x 30 Jahre = 45 m³. Für das Szenario *Hoch* werden grosse Mengen an Altlasten, eine Senkung der Befreiungsgrenzen sowie die Entwicklung neuer abfallproduzierender Technologien postuliert. Auch unter diesen Annahmen ist es höchst unwahrscheinlich, dass die jährlich angelieferte Menge 10 m³/a übersteigt. Als grobe Schätzung wird eine Verdoppelung des maximalen Wertes aus den letzten zehn Jahren gemäss Memo ENSI angenommen, also 4,4 m³/a x 2 = 8,8 m³/a. Bei 30 Jahren ergeben sich 8,8 m³/a x 30 Jahre = 264 m³, gerundet 250 m³.

Als mögliche Szenarien für die MIF-Abfälle aus den Sammelaktionen werden folgende Zahlen für das in 200-l-Fässern **konditionierte Volumen** vorgeschlagen:

Tabelle 4.8: konditionierte Volumina, Abfälle aus der Sammelaktion [m³]

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	45	75	250
2065 bis 2125	90	150	500
2065 bis 2155	135	225	750

⁴ <https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/themen/mensch-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radioaktive-materialien-abfaelle/radium-altlasten.html>

⁵ Dabei wurden gewisse Jahreswerte bereinigt aufgrund des Vorhandenseins von Rückbauabfällen. Solche Anfallsspitzen werden auch in Zukunft in unregelmässigen Abständen zu beobachten sein. Da die absoluten Mengen jedoch limitiert sind, haben solche kurzzeitigen Spitzen kaum Einfluss auf die Gesamtmenge. Zieht man die Werte vor 2006 mit in Betracht, sieht man grosse Schwankungen der Jahreswerte (~1–35 m³/a).

Diese Volumina können in **Zahlen von 200-I-Fässern** (gerundet) konvertiert werden (Annahme: 200-I-Fass = 0,215 m³):

Tabelle 4.9: Anzahl 200-I-Fässer, Abfälle aus der Sammelaktion

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	210	350	1165
2065 bis 2125	420	700	2325
2065 bis 2155	630	1050	3500

Für eine Endlagerung werden die konditionierten 200-I-Fässer in Betoncontainer verpackt, was zu dem «verpackten Volumen» führt. Nach heutigem Konzept werden zwölf 200-I-Fässer in einen Betoncontainer mit einem Volumen $V = 10,3 \text{ m}^3$ verpackt. Dies führt zu einem «effektiven verpackten Volumen» pro 200-I-Fass von $10,3/12 = 0,8583 \text{ m}^3$. Mit diesem Multiplikationsfaktor für die Zahl der 200-I-Fässer ergeben sich die folgenden **verpackten Volumina für die MIF-Sammelabfälle**:

Tabelle 4.10: verpackte Volumina, Abfälle aus der Sammelaktion [m³]

	Tief	Referenz	Hoch
2065 bis 2095	180	300	1000
2065 bis 2125	360	600	2000
2065 bis 2155	540	900	3000

4.4. NORM-Abfälle

NORM⁶-Abfälle mit Aktivitäten über der NORM-Befreiungsgrenze (1000 Bq/kg für U-238, Th-232 und deren Tochternuklide) können nicht uneingeschränkt entsorgt werden. Nach der StSV können NORM-Abfälle in den meisten Fällen deponiert oder wiederverwertet werden, so dass sie nicht als radioaktive Abfälle inventarisiert werden. In diesem Bericht wird davon ausgegangen, dass dies weiterhin so bleibt. Würde man in Zukunft NORM-Abfälle als radioaktive Abfälle betrachten, müsste man mit mehreren hundert Kubikmetern zusätzlichem Abfall rechnen.

⁶ *Natürlich vorkommende radioaktive Materialien (NORM)* sind, nach Art. 2 der StSV, «Materialien mit natürlich vorkommenden Radionukliden, die keine künstlichen radioaktiven Stoffe enthalten; Materialien, in denen die Aktivitätskonzentrationen der natürlich vorkommenden Radionuklide durch bestimmte Prozesse unbeabsichtigt verändert wurden, sind ebenfalls NORM; werden natürlich vorkommende Radionuklide gezielt angereichert, insbesondere zur Nutzung ihrer Radioaktivität, so gelten sie nicht mehr als NORM»

4.5. Diskussion der Inventare

Nebst den Volumina sind für die Endlagerung die radiologischen Inventare relevant für die Zuteilung in ein Lager bzw. in die KEV-Kategorien SMA/ATA/HAA. Die Kategorie HAA (reserviert für Brennelemente und hochaktive verglaste Abfälle aus deren Wiederaufarbeitung) wird für die in diesem Bericht diskutierten Abfälle ausgeschlossen. Die Kategorie ATA (alphatoxische Abfälle mit mehr als 20 000 Bq Alpha-Nukliden/g konditionierter Abfall) dürfte ebenfalls weitgehend wegfallen. In den Abfällen aus der Sammelaktion dominiert H-3. Davon abgesehen werden in Industrie und Medizin in Zukunft nicht-alpha-haltige Abfälle produziert bzw. generell überwiegend kurzlebige Nuklide eingesetzt. Die Abfälle aus der (Gross-)Forschung bestehen primär aus Metallen und Beton. Hier sind Co-60, Na-22, Ni-63 und Eu-152/154 die «dominierenden Nuklide». Diese sind alle verhältnismässig kurzlebig (Halbwertszeiten von ein paar bis zu hundert Jahren), in keinem Fall aber alphatoxisch. Allenfalls möglich, wenn auch unwahrscheinlich, ist das Auftreten noch nicht entdeckter hochkonzentrierter Altlasten nach 2065, durch die alphatoxische Abfälle entstehen würden.

Für die Konditionierung der zu erwartenden Materialien stehen etablierte Verfahren zur Verfügung. Zudem handelt es sich so gut wie ausschliesslich um feste und/oder nicht dispersive Materialien, die mit Füllzement verfestigt werden können. Auch bei der chemischen Charakterisierung sind keine Probleme zu erwarten, im Speziellen sind keinerlei chemotoxische Abfälle zu erwarten.

Fazit: Die nach dem Verschluss des Tiefenlagers zu erwartenden Abfälle werden in die Kategorie SMA fallen, mit einem limitierten und überwiegend kurzlebigen (wenige hundert Jahre) Nuklidspektrum. Auf Grund der Materialzusammensetzung ist die Handhabung und Konditionierung als unkompliziert zu erwarten. Die produzierten Mengen sind überschaubar, fallen aber über sehr lange Zeitperioden und ohne ein klar absehbares Produktionsende an.

4.6. Zusammenfassung der Abfallvolumina und Abfallgebinde

In den folgenden Tabellen werden die zu erwartenden Abfallgebinde-Zahlen (200-I-Gebinde, KC-T12-Container) sowie die endlagergerecht verpackten Abfallvolumina aufgeführt. Die Zahl der Abfallgebinde wird in Kap. 6 für die Abschätzung der «variablen Endlagerkosten» benötigt.

Tabelle 4.11: Anzahl der Gebinde

Sammelperiode	Zahl der Gebinde		
	Tief	Referenz	Hoch

200 I-Gebinde

gesammelte Abfälle	2065 bis 2095	210	350	1165
	2065 bis 2125	420	700	2325
	2065 bis 2155	630	1050	3500

KC-T12-Container

PSI / CERN	2065 bis 2095	3 / 7	14 / 223	20 / 334
	2065 bis 2125	3 / 14	17 / 445	35 / 667
	2065 bis 2155	3 / 20	20 / 667	41 / 1000
Total	2065 bis 2095	10	237	354
	2065 bis 2125	17	462	702
	2065 bis 2155	23	687	1041

Tabelle 4.12: Endlagergerecht verpackte Volumen

	Sammelperiode	Verpacktes Volumen [m ³]		
		Tief	Referenz	Hoch
gesammelte Abfälle	2065 bis 2095	180	300	1000
	2065 bis 2125	360	600	2000
	2065 bis 2155	540	900	3000
PSI	2065 bis 2095	10	60	85
	2065 bis 2125	10	75	151
	2065 bis 2155	10	90	181
CERN	2065 bis 2095	30	1000	1500
	2065 bis 2125	60	2000	3000
	2065 bis 2155	90	3000	4500
Total	2065 bis 2095	220	1360	2585
	2065 bis 2125	430	2675	5151
	2065 bis 2155	640	3990	7681

4.7 Abfallvolumina in der Zwischenlagerung

Für den Fall, dass die Abfälle in Etappen in ein Lager angeliefert werden, muss eine Zwischenlagerung geplant werden. Für das benötigte Zwischenlagervolumen gilt das aktuell beim PSI praktizierte Einlagerungskonzept⁷. Mit den Gebindezahlen aus Tabelle 4.11 ergibt sich (in Analogie zu Tabelle 4.12 für endlagergerecht verpackte Volumina) das maximal benötigte Zwischenlagervolumen in Tabelle 4.13.

Tabelle 4.13: Maximales Zwischenlagervolumen

	Sammelperiode	Zwischenlagervolumen [m ³]		
		Tief	Referenz	Hoch
gesammelte Abfälle	2065 bis 2095	86	144	478
	2065 bis 2125	173	287	954
	2065 bis 2155	259	431	1435
PSI	2065 bis 2095	14	63	91
	2065 bis 2125	14	77	158
	2065 bis 2155	14	90	185
CERN	2065 bis 2095	32	1004	1503
	2065 bis 2125	63	2003	3002
	2065 bis 2155	90	3002	4500
Total	2065 bis 2095	132	1211	2072
	2065 bis 2125	250	2367	4114
	2065 bis 2155	363	3523	6120

Mit diesen Werten können Umfang und Kosten der benötigten Infrastruktur für die Zwischenlagerung abgeschätzt werden.

⁷ *200-I-Gebinde*: Einstellung von neun 200-I-Gebinden in eine Gitterbox mit den Dimensionen L x B x H = 1,9 x 1,9 x 1 m, also einem Volumen von 3,61 m³. Aufgerundet auf 3,7 m³ ergibt dies ein effektives Zwischenlagervolumen pro 200-I-Gebinde von 3,7 m³ / 9 = 0,41 m³.

KC-T12-Container: Direkte Einlagerung ohne Zusatzverpackung. Somit sind archimedisches und Zwischenlagervolumen mit 4,5 m³ pro Container identisch.

5. Entsorgungsoptionen

5.1. Konditionierung und Zwischenlagerung

Nach 2065 braucht es nach wie vor eine Sammelstelle zur sicheren Konditionierung und Zwischenlagerung. Wie es schon heute der Fall ist, werden auch zukünftig radioaktive Abfälle in unregelmässigen Zeitabständen anfallen. Da ein Teil der zukünftigen Abfälle in nichtstaatlichen, d. h. kommerziell betriebene, Anlagen erzeugt werden, ist die langzeitige Lagerung am Ort der Erzeugung im Sinne einer sicheren Kontrolle im Allgemeinen nicht sinnvoll. Aus diesem Grund ist eine Sammelstelle mit genügender Betriebsgarantie (z. B. staatlich betrieben) unerlässlich.

Eine solche Sammelstelle könnte analog zu den derzeitigen Behandlungsanlagen am PSI, wo heute die radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung oder auch Altlasten verarbeitet und konditioniert (z. B. zementiert) werden, an einem geeigneten Ort eingerichtet werden. Eine ähnliche Einrichtung für Materialien aus dem Nichtkernenergiebereich befindet sich in Österreich (Nuclear Engineering Seibersdorf: <http://www.nes.at/>).

Mögliche Bausteine einer solchen Sammelstelle nach Verschluss des geologischen Tiefenlagers in einem Gebäudekomplex oder mehreren:

- Lager für Rohabfälle
- Behandlungsanlagen
- Lagermöglichkeiten für behandelte Abfälle (Zwischenlager)

Die für die hier prognostizierten Abfälle benötigte Infrastruktur ist nicht vergleichbar mit den gegenwärtig geplanten Oberflächenanlagen für geologische Tiefenlager, die andere Funktionen und auch ein anderes Ausmass haben.

5.2. Entsorgungsoptionen in der Schweiz

Die hier betrachteten Abfälle haben im Vergleich zu den Abfällen, die bis zum Ende des Einlagerungsbetriebs des geplanten geologischen Tiefenlagers aus den KKW und im Verantwortungsbereich des Bundes anfallen werden, ein deutlich geringeres Gefährdungspotenzial. Aus den (Gross-) Forschungsanlagen des PSI und des CERN werden ausschliesslich feste nicht dispergierbare Abfälle (Metalle/Beton) anfallen, deren Anteile an radiotoxischen Inventaren (Alpha-Strahler, ATA) vernachlässigbar sind. Auch bei den weiter laufenden Sammelaktionen kann praktisch ausgeschlossen werden, dass alphatoxische (ATA) Materialien in grossen Mengen verwendet werden und entsprechende Abfälle anfallen. Wie oben ausgeführt, besteht höchstens ein gewisses Risiko, dass auch nach dem Jahr 2065 noch Altlasten aus «heutiger Zeit», z. B. mit Radium kontaminierte Altlasten, entdeckt werden. In Bezug auf die Betrachtungen zu den Entsorgungsoptionen ist dieses Risiko aus Sicht der UG aber vernachlässigbar.

Dementsprechend können für die Entsorgung der hier betrachteten Abfälle folgende Alternativen zum heute geplanten geologischen Tiefenlager betrachtet werden:

- Offenhaltung eines kleinen Teils des geologischen Tiefenlagers (gTL) SMA (unter Berücksichtigung der rechtlichen Abgrenzung zum gTL)
- Oberflächennahes Lager
- Oberflächenlager (ähnlich Frankreich oder Spanien)

5.2.1.Offenhaltung eines kleinen Teils des gTL SMA (Option CH-SMA)

Bei dieser Option steht die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur im Vordergrund. Das «erste» SMA-Lager ist versiegelt und befindet sich in der Beobachtungsphase. Vor Verschluss des Gesamtlagers werden die benötigte Anzahl Lagerkavernen im gleichen Lagerperimeter erstellt, befüllt und versiegelt. Danach erfolgt entweder eine längere Beobachtungszeit oder das Lager wird verschlossen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Langzeitsicherheit des «ersten» Lagers nicht beeinträchtigt wird. Dieser Vorschlag müsste im Rahmenbewilligungsgesuch (Lagerkapazität) berücksichtigt werden.

Bei dieser Option sind wichtige Elemente des Lagers bereits vorhanden: die Umzäunung, die Infrastruktur für Ver- und Entsorgung, die Pforte und der Annahmehbereich für radioaktive Abfälle und der Zugang zu den Lagerkavernen (der über die gesamte Betriebszeit offengehalten wird). Die bereits vorhandenen Übertag-Verkehrswege können weiter genutzt werden. Der Zugang zu den Lagerkavernen wird über die gesamte Betriebszeit offengehalten.

Um die hier betrachteten Abfälle zu lagern, bräuchte es drei Lagerkammern, die sich in der Nähe des Zugangs befinden, während der Rest des gTL SMA fest verschlossen ist.

Wartung und Instandhaltung sind relevante Parameter für die Oberflächenanlage und den Zugang zu den Lagerkammern. Bei der Wartung und Instandhaltung des Zugangs zu den Lagerkammern ist zu berücksichtigen, dass dies die gesamte Strecke bis in die volle Tiefe des gTL SMA umfasst.

Diese Option bleibt allerdings nur bis zum effektivem Verschluss des gTL offen. Fallen radioaktive Abfälle nach diesem Zeitpunkt an, was aus heutiger Sicht nicht auszuschliessen ist, dann müssen weitere Lösungen in Betracht gezogen werden.

Die beiden nachfolgenden Varianten entsprechen nicht den geltenden Vorgaben des KEG, radioaktive Abfälle in geologische Schichten einzulagern. Aufgrund der kleinen Volumen und des geringen Gefährdungspotenzials der Abfälle werden sie hier gleichwohl als Optionen behandelt. Bei beiden Varianten wäre eine vollständige Standortsuche sowie ein neuer Sicherheitsnachweis erforderlich.

5.2.2.Oberflächennahes Lager (Option CH-200)

Eine weitere Option wäre die Errichtung eines Lagers in geringer Tiefe. Als mögliche Tiefenlage gilt aufgrund des abgeschätzten Inventars eine Tiefe von ca. 100–200 m. Die Elemente und Nutzungsbedingungen sind dann vergleichbar mit dem jetzt geplanten Tiefenlager für SMA-Abfälle.

5.2.3.Oberflächenlager (ähnlich Frankreich/Spanien) (Option CH-OF)

Diese Option sieht die Errichtung eines Oberflächenlagers vor. Dies bedeutet eine Lagerung der konditionierten Abfälle in speziell dafür vorgesehenen Kammern (z. B. aus Beton) an der Oberfläche. Diese Option wird für gewisse radioaktive Abfälle schon in Frankreich oder Spanien praktiziert. Bzgl. der Konstruktion und Kosten kann auf Erfahrungen mit den in Frankreich bzw. Spanien realisierten Projekten zurückgegriffen werden. Im Gegensatz zu den anderen Varianten könnten die Abfälle ohne Zwischenlagerung (laufend) eingelagert werden.

5.2.4.Randbedingungen und Kostenschätzung für die Optionen

Für die zwei ersten Optionen wird ein Kampagnenbetrieb für die Anlieferung von Abfällen empfohlen. Dies bedingt eine Sammelstelle und ein Zwischenlager.

Auf Grund diverser Unwägbarkeiten dieses in ferner Zukunft zu realisierenden Projekts können die Kosten für die Optionen – basierend auf Überlegungen und Analogien zu den Berechnungen für die Kostenstudie 2016 (KS16) – nur grob abgeschätzt werden. Bei der Option CH-SMA sind als Kriterien die Kostenwirksamkeit der Einlagerung innerhalb/ausserhalb der Beobachtungsphase des gTL SMA bzw. die Finanzierung der Beobachtungsphase zu beachten.

Die Kostenschätzung für das 90-Jahres-Szenario ergibt für CH-SMA, CH-200 ca. 100 Mio. CHF. Für die Option CH-OF könnten diese Kosten auf einen Drittel reduziert werden.

5.2.5.Schätzung von gebindespezifischen «variablen» Einlagerungskosten

Die in 5.2.4 abgeschätzten Kosten sind weitgehend als «Fixkosten» zu betrachten. Zusätzlich sind variable Kosten zu berücksichtigen, mit denen der von den Abfallmengen abhängige Aufwand berücksichtigt wird. Dazu wird analog zur KS16 vorgegangen, wo jeder Abfallgebilde-Kategorie (hier 200-l-Gebinde und KC-T12-Container) ein variabler Tarif pro angelieferter Einheit zugewiesen wird. Die hier anzuwendenden Tarife sind (gerundet) für

- das 200-l-Gebinde: 2300 CHF/Gebinde
- den KC-T12-Container: 7200 CHF/Container

Mit diesen Tarifen ergeben sich folgende variable Kosten für 200-l-Gebinde und KC-T12-Container (Tabelle 5.1), die zu den Fixkosten (s. o.) zu addieren sind.

Tabelle 5.1: variable Kosten für die Tiefenlagerung

	Sammelperiode	Kosten in [kCHF]		
		Tief	Referenz	Hoch
200-l-Gebinde	2065 bis 2155	1449	2415	8050
KC-T12-Container	2065 bis 2155	166	4947	7495
Total	2065 bis 2155	1615	7362	15545

5.3. Multinationale Lösungen

5.3.1. Ausfuhr von radioaktiven Abfällen zur Lagerung

Gemäss KEG müssen in der Schweiz produzierte radioaktive Abfälle grundsätzlich in geologischen Tiefenlagern in der Schweiz entsorgt werden. Dennoch kann für die Ausfuhr von radioaktiven Abfällen ausnahmsweise eine Bewilligung erteilt werden. Dafür müssen bestimmte im KEG erwähnte Voraussetzungen erfüllt sein. Zudem muss der Absender mit dem Empfänger der radioaktiven Abfälle mit Zustimmung der vom Bundesrat bezeichneten Behörde verbindlich vereinbaren, dass der Absender diese nötigenfalls zurücknimmt. Dabei ist nicht ausgeschlossen, dass gewisse Abfalltypen in eine andere Anlage als in ein geologisches Tiefenlager (oberflächennahe Lager wie in Finnland, Schweden) oder Oberflächenlager (Frankreich, Spanien) verbracht würden. Die Entsorgungspflicht wäre im Falle der Ausfuhr dennoch erfüllt. Die Formulierung im KEG weist jedoch auf den Ausnahmecharakter hin.

Länder, die in der Entsorgungsfrage weiter vorangeschritten sind, haben meist gesetzlich verankert, dass keine radioaktiven Abfälle für die Entsorgung importiert werden dürfen. Die EU legt in der Richtlinie 2011/70/Euratom fest, dass Abfälle im Mitgliedsland eingelagert werden sollen, in dem sie entstanden sind. Sie können jedoch – unter Umständen und bei vorhandenem Abkommen – in einer Entsorgungsanlage eines anderen Mitgliedstaats oder Drittstaats verbracht werden. Aufgrund der relativ kleinen Abfallmenge (ca. 4000 m³ in 90 Jahren) wäre eine Beteiligung an einer Entsorgungslösung im Ausland zu überprüfen.

5.3.2. Beteiligung an der Suche nach einer multinationalen Lösung

Für die Beteiligung an einer multinationalen Lösung sind verschiedene Varianten denkbar:

- *Anteilige Beteiligung an den gesamten Vorbereitungsarbeiten (Standortsuche, Bewilligungsverfahren, Bau und Betrieb) (Option INT-VA)*
Diese Variante basiert auf einem Element des niederländischen Entsorgungskonzeptes: Man würde sich einem anderen Land anschliessen und sich anteilmässig an dessen gesamten Vorbereitungsarbeiten für ein Endlagerprojekt beteiligen. Für das in diesem Bericht betrachtete Entsorgungsproblem scheint diese Variante nicht angemessen, weil die Menge der zu entsorgenden Abfälle überschaubar ist. Zudem ist sie wegen der derzeitigen internationalen Situation auch sehr unwahrscheinlich. Juristisch wäre sie aus den Regelungen von Art. 33 Abs. 2 KEG abzuleiten, in denen nicht zwingend eine nationale Beteiligung vorgeschrieben ist. Entsprechende Verhandlungen müssten vermutlich bald aufgenommen werden, angesichts des enormen Zeitbedarfs von der Standortsuche bis zur Realisierung eines Endlagerprojektes.
Eine Untervariante wäre der Beitritt der Schweiz zu einem im Ausland bereits in Umsetzung befindlichen Endlagerprojekt.
- *Vertragliche Regelungen mit einem anderen Staat mit einer langfristigen Betriebsperspektive für ein geeignetes Endlager hinsichtlich der Übernahme der CH-MIF-Abfälle zum Zweck der dortigen Entsorgung. (Option INT-EXP)*
Diese Variante ist prinzipiell durch Art. 34 Abs. 4 KEG abgedeckt, jedoch ohne die dort geforderte Rücknahmemöglichkeit. Angesichts der – im Verhältnis zum typischen Volumen aktueller und geplanter Endlagerprojekte im Ausland – relativ geringen Menge der hier betrachteten Abfälle, besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, ein entsprechendes Partnerland zu finden. Die Schweiz wird selber ein geologisches Tiefenlager (gTL) realisieren. Es wäre deshalb denkbar, diese MIF-Entsorgung im Ausland, zusätzlich zum finanziellen Ausgleich, mit der Entsorgung einer äquivalenten Menge ausländischen Abfalls im Schweizer gTL zu kompensieren (während dessen Betriebszeit). Dies könnte insbesondere für Länder interessant sein, die für SMA eigentlich oberflächennahe Endlagerung vorsehen, aber auch Abfälle entsorgen müssen, für die ein gTL erforderlich ist.
Kritisch könnte bei dieser Variante der zeitliche Abstand bewertet werden, der zwischen Leistung und Gegenleistung liegen würde. Allerdings gibt es bereits positive Beispiele in den Verträgen zur Wiederaufarbeitung von Brennelementen im Ausland; auch hier lagen zwischen der ersten Ausfuhr von Brennelementen, deren Wiederaufarbeitung und dem erfolgreichen Abschluss der daraus resultierenden Abfallrückführung mehr als drei Jahrzehnte.

- *Austausch auf konzeptionellem/planerischem Niveau und allfällige Zusammenarbeit mit anderen Ländern, die grundsätzlich vor demselben Problem stehen. (Option INT-ZUS)*

Hier kommen Länder infrage, die bereits viel früher als die Schweiz damit konfrontiert sein werden, dass sie keine radioaktiven Abfälle mehr erzeugen, die die dauernde Offenhaltung eines gTL rechtfertigen. Hinzu kommen Länder, die bereits heute ausschliesslich MIF-Abfall zu entsorgen haben.

5.4. Diskussion der Optionen

Nach Verschluss der jetzt geplanten Tiefenlager sind voraussichtlich keine hochaktiven Abfälle HAA mehr zu erwarten. Damit ändert sich die Entsorgungsproblematik drastisch. Auf fast 100 Jahre rechnet man mit einer Menge radioaktiver Abfälle in der Grösse einer Turnhalle. Da, auch mit hoher Wahrscheinlichkeit, nur minim alphatoxische (ATA) Abfälle zu erwarten sind, ist der Zeithorizont für ein Lager wesentlich kürzer (einige hundert Jahre gegenüber 200 000 Jahren für ein HAA-Lager).

In allen im Kapitel 5 vorgestellten Optionen ist das oberste Ziel der Sicherheit für Mensch und Umwelt erfüllt. Wie heute wird dies aber zu gegebener Zeit nachzuweisen sein. Rechtlich sind die Optionen mit Ausnahme der Option 5.2.1 mit dem heutigen rechtlichen Rahmen nicht direkt vereinbar. Wie die rechtliche Situation nach dem Verschluss der geplanten Entsorgungsanlagen, also nach 2100, aussehen wird, ist allerdings heute nicht vorherzusagen. Vorausgesetzt, dass die heutigen Grundprinzipien jedoch beibehalten werden, lassen sich gewisse Annahmen treffen. Selbstverständlich ist bei der zukünftigen Bewertung der Optionen gemäss internationaler Praxis und geltenden Vorschriften in der Schweiz vorzugehen. Die Sicherheitsanforderungen an ein zukünftiges Lager sind aus dem konkreten Inventar abzuleiten.

Bei der Suche nach Optionen stellt sich zurecht die Frage der Nutzung der bestehenden Infrastruktur. Wieso sollte man eine neue Anlage bauen, wenn bereits eine solche zur Verfügung steht? Wieso sollte man diese geplante Anlage überhaupt schliessen? Diese Vision ist zwar attraktiv, bringt aber auch Nachteile mit sich.

Gemäss dem EKRA Bericht aus dem Jahr 2000 sieht das Konzept der geologischen Tiefenlagerung oder des kontrollierten geologischen Langzeitlagers (KGL) einen relativ raschen Verschluss der Anlage vor. Dies aus vielen überzeugenden Gründen, wie der Beeinträchtigung des Wirtgesteins oder der Möglichkeit einer raschen Isolierung der Abfälle in einer Krise. Da das Konzept eine Offenhaltung der Zugangsbauwerke während der Beobachtungsphase bestimmt, wäre diese Zeit evtl. für die Einlagerung weiterer Abfälle in einer Nebenkammer nutzbar. Bei der Wahl der Optionen «Offenhaltung eines kleinen Teils des gTL SMA» müssten diese Punkte abgeklärt werden. Sie müssten evtl. schon beim Rahmenbewilligungsgesuch für die heute geplanten geologischen Tiefenlager mitbeantragt werden, was Auswirkungen auf das gegenwärtige Projekt haben könnte. Diese Option würde aber in allen Fällen nur für eine begrenzte Zeit zur Verfügung stehen, wohingegen radioaktive Abfälle voraussichtlich auch danach anfallen werden.

Wenn man andererseits ein neues Lager an einem anderen Standort bauen möchte, müsste die Suche danach neu – oder teilweise neu – aufgenommen werden. Wie die Erfahrung gezeigt hat, ist eine solche Suche aufwendig und kostspielig. Bis die erwähnte «Turnhalle» gefüllt wäre, vergehen aber möglicherweise bis zu 100 Jahre, was Zeit für eine Standortsuche lassen würde. Die Option «Oberflächennahes Lager» hätte einen bedeutenden Vorteil: Man würde so nicht die bestehende Lagerungs-Lösung für die grosse Menge problematischer Abfälle gefährden, um eine Lösung für die kleine Menge schwachaktiver Abfälle zu schaffen. Den gleichen Vorteil bietet die Option «Oberflächenlager». Eine solche Entsorgungslösung wurde jedoch in der Schweiz bisher nicht in Betracht gezogen; man müsste sie entsprechend eingehender analysieren. Auch die multinationalen Optionen haben den Vorteil, das existierende Projekt nicht zu gefährden. Sie wären bei einer überschaubaren Abfallmenge zumindest in Betracht zu ziehen.

Fazit: Alle betrachteten Optionen weisen Vor- und Nachteile auf. Eine umfassende Beurteilung der Optionen sprengt den Rahmen dieser UG.

Die Sicherheit muss in jedem Fall oberste Priorität haben, was für alle Optionen möglich ist. Bei einer Beurteilung sind folgende Parameter zusätzlich in Erwägung zu ziehen:

- Risiko (technisch, politisch, gesellschaftlich) für das jetzige Projekt und somit für die zeitgerechte Entsorgung der KKW-Abfälle
- Wirtschaftlicher Einsatz der Ressourcen / Verhältnismässigkeit
- Erhalt der jetzt vorhandenen Kompetenzen und Kenntnisse
- Sicherstellung der Grundleistung, nämlich die Entsorgung der zukünftig anfallenden Abfälle
- Flexibilität der Lösung (bezüglich Inventarentwicklungen aber auch gegenüber sonstige Entwicklungen)

6. Schlussfolgerungen

In diesem Bericht zuhanden der Agneb wurde die Entsorgung der künftig anfallenden radioaktiven Abfälle nach Ende des Einlagerungsbetriebs der geplanten Tiefenlager untersucht. Wie einleitend beschrieben, hängen sowohl die Menge radioaktiver Abfälle wie auch die möglichen Optionen von vielen Parametern ab, deren Entwicklung auf dieser Zeitskala schlecht voraussehbar sind. Die Arbeitsgruppe hat deshalb versucht, sich auf bestehende Kenntnisse und Planungen, bekannte oder z. T. bekannte technologische Entwicklungen zu stützen, um Inventarprognose und Entsorgungsoptionen darzulegen. Wie die in Kapitel 4 präsentierten Abfallmengen-Szenarien illustrieren, sind die Prognoseunsicherheiten sehr gross und berücksichtigen keine drastischen technologischen Entwicklungen oder den rechtlichen bzw. gesellschaftlichen Wandel. Nichtsdestotrotz können die von der Arbeitsgruppe gewonnenen Erkenntnisse zum besseren Umschreiben des Sachverhalts beitragen und den Entscheidungsträgern wichtige Hinweise liefern.

Wie in Kapitel 4 dargestellt, wird eine diskontinuierliche Entstehung / Anlieferung der Abfälle erwartet, wie wir sie jetzt schon im Bereich der Medizin, Industrie und Forschung kennen. In diesem Sinne wird weiterhin eine Sammelstelle für solche Abfälle benötigt, wo diese konditioniert und sicher zwischengelagert werden. Wie eine solche Anlage technisch und administrativ zu betreiben sein wird, wird bis Ende des Einlagerungsbetriebs des Tiefenlagers zu entscheiden sein.

Insgesamt wird über 90 Jahre nach Betriebsende des geologischen Tiefenlagers im Referenzfall ein Abfallvolumen von etwa 4000 m³ erwartet. Dies entspricht in etwa der Grösse einer mittleren Turnhalle. Die Szenarien *Tief* und *Hoch* zeigen zwar grosse Unterschiede zu diesem Wert (von ~ 1/6 bis ~ das Doppelte), ergeben aber kein komplett anderes Bild. Das macht die nötigen gedachten Infrastrukturen oder Prozesse nicht unrealistisch. Die Hauptbeiträge zu diesem Volumen kommen aus dem CERN und den Abfällen aus der Sammelaktion (Privatwirtschaft). Bei diesen Produzenten sind aber auch die Unsicherheiten am grössten, da sie sehr stark von gesellschaftlichen oder marktwirtschaftlichen Entwicklungen abhängig sind. Vom PSI werden nur noch wenige radioaktive Abfälle erwartet, da die Entsorgung der jetzigen abfallproduzierenden Anlagen vor dem Ende des Einlagerungsbetriebs der geplanten Tiefenlager geplant ist. Der Umstieg auf Technologien, die weniger Abfall produzieren (wie z. B. SwissFEL) mindert die erwartete Abfallmenge weiter. Nach Meinung der UG ist ein komplettes Versiegen der radioaktiven Abfallproduktion in der Schweiz aber kaum denkbar, so dass weiterhin eine Grundlast an Abfällen zu entsorgen sein wird.

In Kapitel 5 hat die UG verschiedene plausible Optionen untersucht. Wie im Kap. 5.4 dargelegt, zeigen alle Optionen Vor- und Nachteile. Angesichts des langen Zeithorizonts und der gedachten Anfallsmuster zukünftiger Abfälle (diskontinuierlicher Anfall mit grossen Unsicherheiten über mehrere Jahrzehnte), wäre ein momentaner Entscheid für die eine oder die andere Option verfrüht. Vielmehr müssen die untersuchten Optionen als Denkanstoss für zukünftige Entscheide dienen. Wie bereits erwähnt wird sich die Schweiz, nach Verschluss der geplanten Tiefenlager, in einem ganz anderen Umfeld bezüglich radioaktiver Abfälle bewegen. Wie die Gesellschaft, die Politik und folglich die Gesetzgebung sich darauf einstellen werden, ist heute schwierig vorzusehen. Die heute geplanten Tiefenlager stellen für die Schweiz eine Herausforderung dar. Jedoch wird damit eine sichere Lösung für die Entsorgung von hochaktiven und problematischen Abfällen erreicht. Die in diesem Bericht dargestellten kleinen Mengen an schwachaktiven Abfällen dürfen diese wichtige Zielsetzung nicht gefährden.