

**Arbeitsgruppe des Bundes
für die nukleare Entsorgung
(Agneb)**

**Auswirkungen einer
verlängerten Abklinglagerung auf
die radioaktiven Abfälle**

Bericht der Untergruppe «Abklinglager»

Version 9 / März 2015

Verabschiedet am 10.4.2015

Arbeitsgruppe («Untergruppe Abklinglager»)

Dr. Werner Zeller, Bundesamt für Gesundheit BAG (Vorsitz)

ab 2014 abgelöst von Dr. Sebastien Baechler

Dr. Olivier Beffort, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, ersatzweise Dr. Stefan Theis, ENSI

Dr. Markus Hugi, ENSI

Dr. Harald Maxeiner, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle Nagra

Hr. Joachim Müth, Paul Scherrer Institut PSI

Dr. José Rodriguez, Bundesamt für Energie BFE

Hr. Raphael Stroude, BAG

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Mandat	4
3	Zielsetzung	4
3.1	Minimierung radioaktiver Abfälle	4
4	Bewertungsgrundlagen	5
4.1	Neue Freigrenzen	5
4.2	Beginn der Abklinglagerung (t_0)	6
5	Ergebnisse	6
5.1	Abfallvolumen der KKW-Abfälle	6
5.1.1	Stilllegungsabfälle der KKW (KKW-SA)	7
5.1.2	Betriebsabfälle der KKW (KKW-BA)	8
5.2	Diskussion der Ergebnisse für KKW-Abfälle	9
5.3	Abfallvolumen des PSI	10
5.3.1	Volumina für alte Freigrenze FG-StSV	10
5.3.2	Volumina für neue Freigrenze FG-IAEA	10
5.3.3	Vergleich der Werte FG-StSV/FG-IAEA	11
5.4	Diskussion der Ergebnisse für PSI-Abfälle	13
5.5	Zusätzliche Optimierungsmassnahmen	13
5.6	Lager für Abklinglagerung	14
5.7	Risiken einer verlängerten Abklinglagerung	14
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	16

1 Einleitung

Das Strahlenschutzgesetz (StSG, SR 814.50) fordert, dass mit radioaktiven Stoffen so umzugehen ist, dass möglichst wenig radioaktive Abfälle entstehen (Art. 25 StSG). Grundsätzlich sieht es eine Entsorgung im Inland vor (Art. 25 Abs. 3 StSG, Art. 30 Abs. 2 Kernenergiegesetz KEG, SR 732.1). Als Entsorgungsweg im Inland gestattet das KEG ausschliesslich das Verbringen in geologische Tiefenlager (Art. 31 KEG). Unter bestimmten Voraussetzungen gestattet die Gesetzgebung die Abgabe von radioaktiven Abfällen geringer Aktivität an die Umwelt.

Um das Gebot der Abfallminimierung zu erfüllen, schreibt Artikel 85, Absatz 2 der Strahlenschutzverordnung (StSV, SR 814.501) vor: *Abfälle, die spätestens 30 Jahre nach ihrer Entstehung aufgrund des radioaktiven Zerfalls aus dem Geltungsbereich nach Artikel 1 fallen, sind von den radioaktiven Abfällen zu trennen, wenn keine gesamthaft günstigere Alternative für Mensch und Umwelt zur Verfügung steht.*

Heute ist in der Strahlenschutzverordnung somit eine Abklingzeit von 30 Jahren festgelegt. Es handelt sich dabei um einen überblickbaren, absehbaren Zeitabschnitt von einer Menschengeneration. Es kann heute davon ausgegangen werden, dass die grossen Betriebe wie das Paul Scherrer Institut (PSI), das CERN und die Eigentümer der schweizerischen Kernkraftwerke, die die Abklinglagerung z. T. praktizieren, auch in 30 Jahren als Institutionen noch bestehen werden.

Für die Abklinglagerung sind die Abfälle nach StSV so zu verpacken und aufzubewahren, dass ein unkontrollierter Austritt radioaktiver Stoffe verhindert und eine Brandgefahr vermieden wird. Sie müssen gekennzeichnet und mit einer Dokumentation versehen sein. Für den Betrieb eines Abklinglagers ist eine Betriebsbewilligung notwendig. Eine systematische Abklinglagerung wird bei den grossen Forschungsanlagen schon heute praktiziert. Aufgrund der noch fehlenden grossen Mengen an Stilllegungsabfällen wird die Abklinglagerung bei den Kernkraftwerken nur für geringe Mengen von Betriebsabfällen angewendet.

Im Rahmen der laufenden Revision der Strahlenschutzverordnung werden neue, international abgestützte Freigrenzen übernommen.¹ Da diese teilweise tiefer als die bisherigen Freigrenzen angesetzt sind, werden damit zunächst grössere Abfallvolumina entstehen. Es steht deshalb zur Diskussion, ob eine verlängerte Abklinglagerung von bis zu 100 Jahren mit einer abschliessenden Weiterverwendung bzw. konventioneller Entsorgung der abgeklungenen inaktiven Materialien eine gesamthaft für Mensch und Umwelt günstigere Lösung darstellt.

¹ IAEA, *International Basic Safety Standards INTERIM EDITION* (2011).

2 Mandat

Zur Beantwortung dieser Frage hat die Agneb am 19. September 2012 eine Arbeitsgruppe mit folgendem Mandat eingesetzt:

«Die Untergruppe prüft Vor- und Nachteile einer 100-jährigen Lagerung radioaktiver Abfälle kurzer Halbwertszeit sowie die notwendigen Voraussetzungen. Sie beurteilt, ob die temporäre Lagerung während etwa 100 Jahren und eine anschliessende Weiterverwendung der abgeklingenen inaktiven Materialien eine gesamthaft für Mensch und Umwelt günstigere Lösung darstellt als die aktuelle Praxis. Sie erstattet der Agneb bis Ende 2013 Bericht.

Gegebenenfalls wird von Bundesseite geprüft, wie eine solche Lösung gesetzlich verankert werden könnte.»

Die Arbeitsgruppe stützt ihre Beurteilung hauptsächlich auf die von der Nagra geführten Datenbanken ISRAM (Informationssystem für radioaktive Materialien) und MIRAM² (Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien) ab. Nebst den Auswirkungen einer verlängerten Abklinglagerung auf die Abfallinventare, Volumina und Massen werden die Folgen der neuen geplanten Freigrenzen untersucht. Betrachtet werden die Betriebsabfälle der Kernkraftwerke (KKW-BA) und der Forschungsanlagen sowie die Stilllegungsabfälle der Kernkraftwerke (KKW-SA) und der Forschungsanlagen. Abgebrannte Brennelemente und Wiederaufbereitungsabfälle sind nicht Gegenstand der Prüfung, da für diese eine Abklinglagerung aufgrund der hohen Aktivitäten und langen Halbwertszeiten in keinem Fall einen Nutzen hätte.

3 Zielsetzung

3.1 Minimierung radioaktiver Abfälle

Art. 30 Abs. 1 KEG und Art. 25 Abs. 2 StSG schreiben das so genannte Minimierungsgebot fest, d. h., dass der Anfall radioaktiver Abfälle bereits beim Umgang mit radioaktiven Stoffen so gering wie möglich gehalten werden soll. Sinngemäss ist eine Minimierung gegebenenfalls auch in Art. 26 Abs. 2 StSG vorgeschrieben. Folgerichtig sind nach den Regelungen der Art. 79 bis Art. 83 StSV Abfälle mit geringer spezifischer Aktivität, von denen keinerlei Gefährdung für die Umwelt ausgeht, von der Entsorgungspflicht in einem geologischen Tiefenlager ausgenommen. Ein Teil dieser Abfälle kann nach einer allfälligen Abklinglagerung als «inaktiv» freigemessen und konventionell entsorgt oder wiederverwendet werden. Über das rein volumenbezogene Reduktionspotential hinaus kann so im Tiefenlager durch eine Reduktion des Anteils an Organika und metallischen Komponenten nach heutiger Konzeption die Barrierenwirkung des Lagersystems im Falle von Eindringen von Wasser verbessert werden.

Organische Abfälle

Verschiedene Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle, insbesondere organische Stoffe, sind für die geologische Tiefenlagerung von sicherheitsrelevanter Bedeutung, weil sie die Mobilität der Radionuklide erhöhen können.

Heute liefern primär Ionenaustauscherharze und bituminierte Konzentrate nennenswerte Anteile an Organika als Rohabfall oder als Matrixmaterial. Diese sind jedoch von so hoher spezifischer Aktivität, dass sie auch nach mehreren Jahrzehnten noch deutlich über den Freigrenzen liegen, weshalb eine verlängerte Abklinglagerung hier keinen Sinn macht. Allfällige weitere

² Es handelt sich hier um die Version MIRAM 12, die speziell für die vorliegende Untersuchung erstellt wurde (NAGRA NAB 13-39).

Aspekte dieser Abfallströme waren Gegenstand des Projektes «Abfallbewirtschaftung im Vergleich» aus dem Forschungsprogramm «Radioaktive Abfälle» der Agneb.

Metallische Abfälle

Korrosionsraten, Gasbildung und Wasserstoff-Abbau durch metallhaltige Abfälle in einem geologischen Tiefenlager werden gegenwärtig von der Nagra untersucht. Falls erforderlich, ist die Menge von Metallen im geol. Tiefenlager zu minimieren.

Bei den metallischen schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA) handelt es sich vorwiegend um Stilllegungsabfälle aus Eisen oder Stahl aus Kernkraftwerken und Grossforschungsanlagen (PSI, CERN). Für die Gasproduktion ist nicht alleine die *Masse* des Metalls ausschlaggebend, sondern die für einen korrosiven, d. h. gasbildenden Angriff verfügbare *Oberfläche*. Beim grössten Teil der Abfälle ist diese wesentlich grösser als beim inaktiven Metall der Behälter und Strukturmaterialien im Tiefenlager. Letztgenannte Materialien lassen also eine geringere Gasproduktionsrate pro kg Metall erwarten.

Auch bei den metallischen Abfällen gibt es einen Anteil, der von seinen radiologischen Eigenschaften her für eine Abklinglagerung nicht geeignet ist: Es sind dies die nennenswert aktivierten, mittelaktiven so genannten Reaktorabfälle sowie die Reaktordruckgefässe der KKW.

Für alle restlichen metallischen Abfälle erweisen sich Trennen, Dekontaminieren, Freimesen und Wiederverwenden als erfolgversprechende und prüfenswerte Massnahmen zur Reduktion der Abfallmengen im SMA-Lager, die durch die Abfallverursachenden bereits heute umgesetzt werden. Auch das Einschmelzen von kontaminierten Metallen leistet bereits heute einen Beitrag, um mehr Material einer Freimessung mit anschliessender Wiederverwendung zuzuführen. Zur reinen Volumenreduktion ohne anschliessende Inaktivfreimessung – also allein um zu einem günstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnis und damit zu einer geringeren Gasbildungsrate für die metallischen Abfälle zu gelangen – wird das Umschmelzen bisher weder in der Schweiz noch im Ausland im grossen Massstab eingesetzt. Weitere Aspekte metallischer Abfälle waren Gegenstand des Projektes «Abfallbewirtschaftung im Vergleich» aus dem Forschungsprogramm «Radioaktive Abfälle» der Agneb.

4 Bewertungsgrundlagen

4.1 Neue Freigrenzen

In der revidierten Strahlenschutzverordnung sollen die international harmonisierten Freigrenzen übernommen werden. Für die unbedingte Freimessung grosser Mengen von Material sind es die Werte der IAEA, entsprechend dem Safety Guide RS-G-1.7.³

Da im Safety Guide RS-G-1.7 der IAEA nur 257 Radionuklide aufgeführt sind, hat das BAG die Firma Brenk Systemplanung beauftragt, mit den gleichen Modellen und Szenarien die fehlenden Radionuklide zu berechnen. Die Resultate sind in einem detaillierten Bericht zusammengestellt.⁴ Diese Zahlenwerte dienen für die im Kapitel 5 aufgeführten Berechnungen.

³ IAEA, Safety Requirements: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, Revision of IAEA Safety Series N°115, GOV2011/42, 15 August 2011; Tabelle I-2

⁴ Berechnung von Freigrenzen und Freigabewerten für Nuklide, für die keine Werte in den IAEA-BSS vorliegen
Endbericht, Brenk Systemplanung, Aachen, 2012, verfügbar auf der Internetseite des BAG.

4.2 Beginn der Abklinglagerung (t_0)

Für die Ermittlung der Materialmengen bei der Abklinglagerung ist entscheidend, ab welchem Zeitpunkt t_0 das Zeitintervall zu zählen beginnt. Je nach Situation und Herkunft der Abfälle sind unterschiedliche Annahmen anzuwenden. Die Arbeitsgruppe verwendet für die Abschätzungen die folgenden Zeitpunkte:

- Nach Strahlenschutzgesetz sind radioaktive Abfälle radioaktive Stoffe oder radioaktiv kontaminierte Materialien, die nicht weiterverwendet werden. Der Zeitpunkt des «Entstehens» des radioaktiven Abfalls nach Art. 85 Abs. 2 StSV ist somit grundsätzlich der Zeitpunkt der Deklaration des Materials als Abfall.
- Die Abklinglagerung beginnt für die hier gemachten Abschätzungen 10 Jahre nach der endgültigen Ausserbetriebnahme einer Kernanlage oder dem Ausbau der Komponente⁵. Je nach Stilllegungskonzept kann dieser Zeitraum auch deutlich kürzer sein.

5 Ergebnisse

5.1 Abfallvolumen der KKW-Abfälle

Radioaktive Abfälle der Kernkraftwerke werden übergeordnet kategorisiert in

- BA: Betriebsabfälle (Harze, Konzentrate, Filter, Mischabfälle, ...),
- RA: Reaktorabfälle (Primär aktivierte metallische Komponenten),
- SA: Stilllegungsabfälle (Metalle, Beton, Mischabfälle),
- WA: Wiederaufarbeitungsabfälle,
- BE: Abgebrannte Brennelemente für die direkte geologische Tiefenlagerung.

Für diese Kategorien werden im «Informationssystem für radioaktive Materialien (ISRAM)» und dem «Modellhaften Inventar für radioaktive Materialien (MIRAM)» der Nagra detaillierte (Nuklid-)Inventare geführt. ISRAM verwaltet die existierenden Materialien und Abfälle, in MIRAM werden auch die erst in Zukunft anfallenden und ebenfalls in ein geologisches Tiefenlager zu verbringenden Materialien und Abfälle modellhaft erfasst.

Auf Grund ihrer hohen nuklidspezifischen Aktivitäten können die Abfälle der Kategorien RA, WA, BE auch nach deutlich längeren Abklingzeiten nicht freigemessen werden. Diese werden daher nicht betrachtet.

Für die vorliegende Untersuchung wird für Betriebs- und Stilllegungs-Materialien und -Abfälle:

- die zeitliche Entwicklung des Radionuklidinventars ab dem Zeitpunkt der Entstehung bzw. Konditionierung («Abklingzeit») des jeweiligen Abfalls berechnet;
- durch Vergleich mit den nuklidspezifischen Freigrenzen (unter Berücksichtigung der Summenregel) zu den verschiedenen Abklingzeiten untersucht, welcher Bruchteil der radioaktiven Materialien als radioaktiver Abfall zu betrachten oder freimessbar ist.

Die Analyse erfolgt speziell für Abklingzeiten von 0, 30, 60, 90 Jahren nach dem Zeitpunkt des Anfalls bzw. der Entstehung des jeweiligen Materials. Als nuklidspezifische Freigrenzen werden sowohl die z. Z. noch gültigen als auch die neu geplanten Freigrenzen zu Grunde gelegt. Zur Analyse mit dem Vergleich der zeitabhängigen Nuklidinventare mit den Freigrenzen wird das gesamte Nuklidspektrum herangezogen (Abfallinventar und Freigrenzen). Tatsächlich

⁵ Gilt insbesondere für die Beschleunigerkomponenten der Forschungsanlagen

werden die Resultate jedoch durch wenige Nuklide dominiert: durch Co⁶-60 für metallische Abfälle (inkl. Betonarmierungen) und Eu⁷-152/Eu-154 für Beton-Abfälle (biologischer Schild bei allen KKW und Drywell bei Siedewasserreaktoren). Für diese Nuklide gelten die massenspezifischen Freigrenzen FG-StSV (z. Z. geltende Freigrenzen) und FG-IAEA (neu geplante Freigrenzen) gemäss Tabelle 1:

Nuklid	FG-StSV [Bq/g]	FG-IAEA [Bq/g]
Co-60	1	0.1
Eu-152	7	0.1
Eu-154	5	0.1

Tab. 1: Massenspezifische Freigrenzen für relevante Nuklide (alte/neue Freigrenzen).

5.1.1 Stilllegungsabfälle der KKW (KKW-SA)

Die folgende Abbildung 1 und Tabellen 2 und 3 zeigen die zeitliche Entwicklung des konditionierten Abfallvolumens der KKW-SA für die geologische Tiefenlagerung.

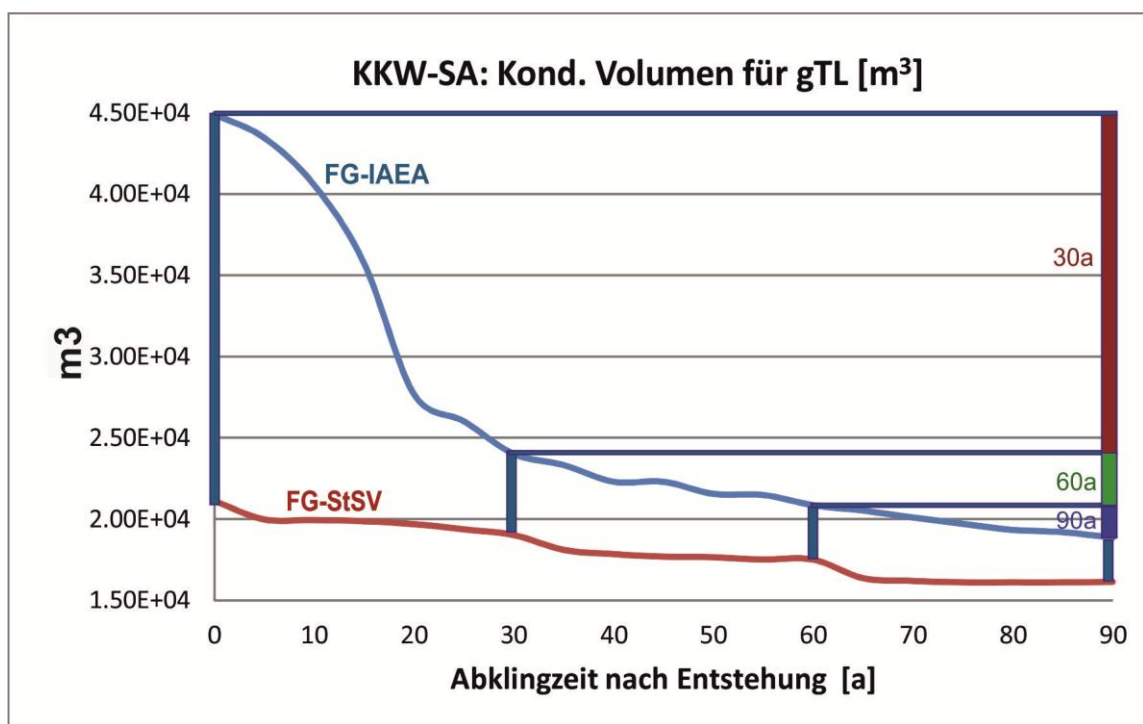


Abb. 1: Entwicklung des konditionierten Abfallvolumens für die geologische Tiefenlagerung (gTL) in Abhängigkeit von der Abklingzeit; Entwicklung für heutige Freigrenzen (FG-StSV) und neue Freigrenzen (FG-IAEA). Zusätzlich sind Differenzen der Abfallvolumina alt/neu sowie die Grössenordnung für Reduktion der Abfallvolumina zum Zeitpunkt der Abfall-Entstehung sowie Abklingzeiten von 30, 60 und 90 Jahren ausgewiesen.

[m³] / Abklingzeit	0 a	30 a	60 a	90 a
FG-StSV	21'150	19'000	17'500	16'150
FG-IAEA	44'900	24'000	20'850	18'850

⁶ Cobalt

⁷ Europium

Delta [m ³]	23'750	5'000	3'350	2'700
Delta	112 %	26 %	19 %	17 %

Tab. 2: Resultate aus Abbildung1 für Abklingzeiten 0, 30, 60 und 90 Jahren mit absoluten und prozentualen Differenzen der Abfallvolumina bei alten/neuen Freigrenzen.

FG-IAEA	0 a	30 a	60 a	90 a
Volumen [m ³]	44'900	24'000	20'850	18'850
Abnahme zu 0 a	–	47 %	54 %	58 %
Metalle [Mg]	22'100	11'400	9'600	8'400
Abnahme zu 0 a	–	49 %	57 %	62 %

Tab. 3: Für FG-IAEA und KKW-SA: Zeitliche Entwicklung des Abfallvolumens aus Tabelle 2 und Massen der metallischen Rohabfälle für die geologische Tiefenlagerung.

5.1.2 Betriebsabfälle der KKW (KKW-BA)

Die folgende Abbildung 2 und Tabellen 4 und 5 zeigen die zeitliche Entwicklung des konditionierten Abfallvolumens der KKW-BA für die geologische Tiefenlagerung.

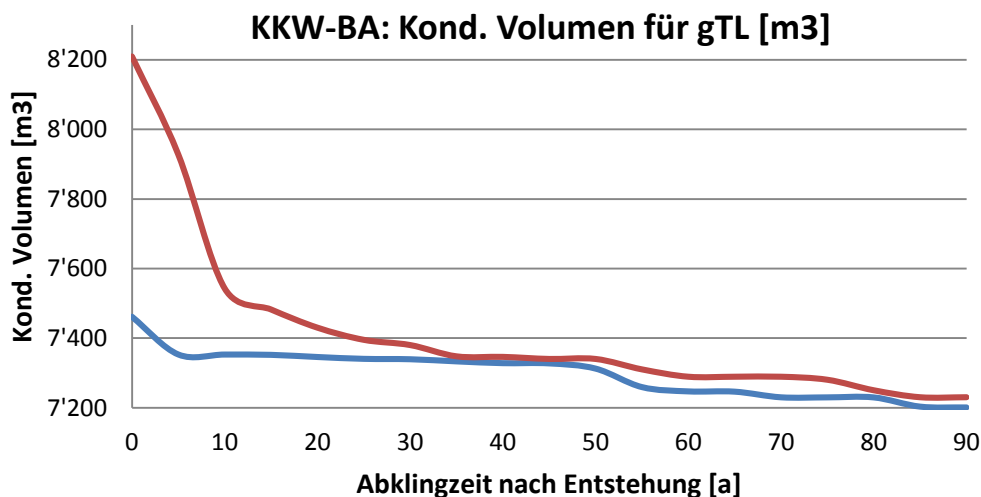


Abb. 2: Entwicklung des konditionierten Abfallvolumens für die geologische Tiefenlagerung (gTL) in Abhängigkeit von der Abklingzeit; Entwicklung für heutige Freigrenzen (FG-StSV, blau) und neue Freigrenzen (FG-IAEA, rot).

[m ³] / Abklingzeit	0 a	30 a	60 a	90 a
FG-StSV	7'400	7'290	7'200	7'150
FG-IAEA	8'210	7'380	7'285	7'230
Delta [m ³]	810	90	85	80
Delta	11 %	1 %	1 %	1 %

Tab. 4: Resultate aus Abbildung 2 für Abklingzeiten 0, 30, 60 und 90 Jahren mit absoluten und prozentualen Differenzen der Abfallvolumina bei alten/neuen Freigrenzen.

FG IAEA	0 a	30 a	60 a	90 a
Volumen [m ³]	8'210	7'380	7'285	7'230
Abnahme zu 0 a		10%	11%	12%
Metalle [Mg]	1'630	645	629	610
Abnahme zu 0 a		60 %	61 %	62 %

Tab. 5: Für FG-IAEA und KKW-BA: Zeitliche Entwicklung des Abfallvolumens aus Tabelle 4 und Massen der metallischen Rohabfälle für die geologische Tiefenlagerung.

5.2 Diskussion der Ergebnisse für KKW-Abfälle

Die Analyse ergibt, dass mit den neuen IAEA-Grenzwerten nach einer 30-jährigen Abklinglagerung ein etwa gleich grosses Abfallvolumen der KKW vorliegt, wie zum Zeitpunkt t_0 mit den heute gültigen Werten, nämlich ca. 31 400 m³. Davon stammen 76,5 % aus der Stilllegung und 23,5 % aus dem vormaligen Betrieb. Hinsichtlich des metallischen Anteils stammen unter den gleichen Randbedingungen sogar 95 % aus der Stilllegung und lediglich 5 % aus der Betriebsphase.

KKW-BA: Für die Betriebsabfälle der KKW (KKW-BA) hat der Übergang von FG-StSV zu FG-IAEA kaum Auswirkungen auf die in ein geologisches Tiefenlager einzubringenden Abfallvolumina (Tab. 4). Nach einer Zunahme von ca. 10 % zu Beginn (Zeitpunkt 0 a) sind die Abfallvolumina nach einer Abklingzeit von 30 Jahren nahezu identisch und nehmen kaum noch ab. Der Grund liegt in den Eigenschaften der KKW-BA: Es handelt sich überwiegend um nicht-metallische Abfälle mit massgeblichen Anteilen langlebiger Nuklide (z. B. Cs⁸-137), für die eine Abklinglagerung kaum Nutzen bringt.

Metallische Rohabfälle der KKW-BA: Bei den metallischen Anteilen an den KKW-BA unterscheidet sich die Situation (Tab. 5). Es handelt sich hierbei um überwiegend schwach kontaminierte Metalle mit Co-60 als Leitnuklid und deutlich geringeren Inventaren an langlebigen Nukliden. Dementsprechend kann durch eine 30-jährige Abklinglagerung eine Reduktion der in das Tiefenlager einzubringenden metallischen Rohabfallmasse von ca. 60 % erreicht werden. Eine längere Abklinglagerung führt aber zu keiner weiteren nennenswerten Reduktion (Tab. 5).

KKW-SA: Für die Stilllegungsabfälle (KKW-SA) stellt sich die Situation wiederum etwas anders dar. Zunächst sind die anfallenden Volumina und Massen – unabhängig von der Abklingzeit – deutlich höher als bei den KKW-BA. Der Übergang von FG-StSV zu FG-IAEA führt zu Beginn (Zeitpunkt 0 a) zu mehr als einer Verdopplung des Abfallvolumens (112 %, Zunahme gemäss Tab. 2) und nach 30/60/90 Jahren Abklingzeit noch zu einer Zunahme von 26/19/17 % gegenüber den Volumina gemäss alten Freigrenzen. Als Bilanz für FG-IAEA bei unterschiedlichen Abklingzeiten gemäss Tab. 2 heisst dies: Nach 30 Jahren Abklingzeit nimmt das Abfallvolumen um ca. 47 % ab, bei weiteren 30 bzw. 60 Jahren Abklingzeit nur noch um weitere ca. 13 bzw. 10%.

Metallische Rohabfälle der KKW-SA: Der Verlauf für die Metallmassen bei den KKW-SA ist ähnlich wie bei den KKW-BA. Die KKW-SA sind fast ausschliesslich aktivierte und kontaminierte Metalle und Beton, die relativ zu den Leitnukliden Co-60 (Metalle) und Eu-152/Eu-154 (Beton) deutlich geringere Inventare langlebiger Nuklide aufweisen. Dementsprechend ergeben sich bei der Abklinglagerung ähnliche Abnahmen der Metallmassen wie bei den Abfallvolumina (Tab. 3).

⁸ Cäsium

5.3 Abfallvolumen des PSI

Für die Abschätzungen der Abfallmassen und -Volumina sind die Stilllegungsabfälle des PSI-West (PSI-W) massgebend. Zu diesem Zweck hat das PSI die Rohabfallvolumina für FG-StSV in Abhängigkeit von der Abklingzeit nach Konditionierung/Entstehung der Abfälle berechnet.

Es muss beachtet werden, dass die folgenden Abschätzungen (Tab. 6 und 7) mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird dennoch mit berechneten, nicht gerundeten Daten gearbeitet.

5.3.1 Volumina für alte Freigrenze FG-StSV

FG-StSV	0 a	30 a	60 a	90 a
Stahl/Metalle [m ³]	1'575	934	689	498
Beton [m ³]	3'139	1'962	1'472	1'171

Tab. 6: Vom PSI aktuell abgeschätzte Abnahme der Rohabfallvolumina ab t_0 in Abhängigkeit von der Abklingzeit nach Konditionierung/Entstehung der Abfälle für FG-StSV. Die Daten werden in den kommenden Jahren überprüft und gegebenenfalls revidiert.

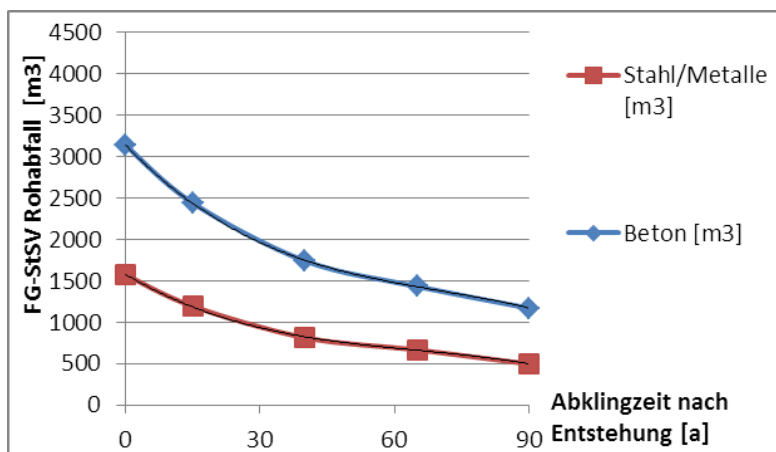


Abb. 3: Graphische Darstellung der abgeschätzten Abnahme der Rohabfallvolumina des PSI auf Grundlage der FG-StSV ab t_0 .

5.3.2 Volumina für neue Freigrenze FG-IAEA

FG-IAEA	0 a	30 a	60 a	90 a
Stahl/Metalle [m ³]	1'998	1'325	1'093	913
Beton [m ³]	5'706	4'479	4'031	3'718

Tab. 7: Abnahme der Rohabfallvolumina ab t_0 in Abhängigkeit von der Abklingzeit nach Konditionierung/Entstehung der Abfälle für FG-IAEA.

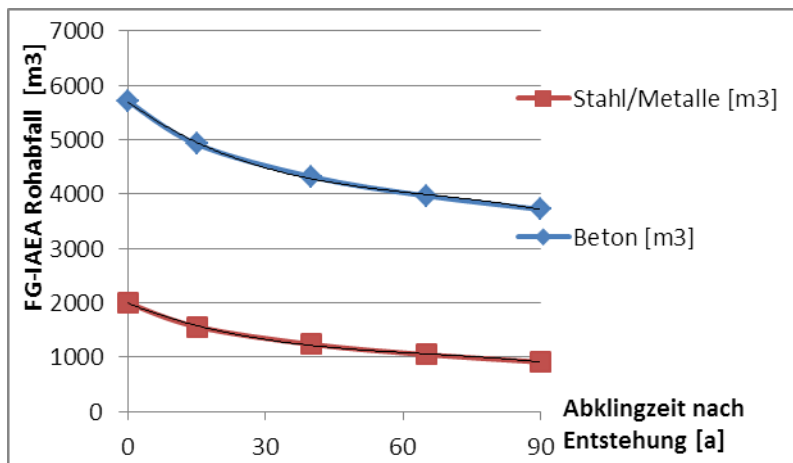


Abb. 4: Graphische Darstellung der abgeschätzten Abnahme der Rohabfallvolumina des PSI auf Grundlage der FG-IAEA ab t_0 .

5.3.3 Vergleich der Werte FG-StSV/FG-IAEA

[m ³] / Abklingzeit	0 a	30 a	60 a	90 a
FG-StSV	9'700	5'937	4'467	3'500
FG-IAEA	15'325	11'366	9'943	8'925
Delta [m ³]	5'625	5'428	5'476	5'425
Delta	58 %	91 %	123 %	155 %

Tab. 8: Verpacktes Abfallvolumina des PSI-W interpoliert für Abklingzeiten 0, 30, 60 und 90 Jahren mit absoluten und prozentualen Differenzen bei alten/neuen Freigrenzen (FG-StSV/FG-IAEA).

FG-IAEA	0 a	30 a	60 a	90 a
Volumen [m ³]	15'325	11'366	9'943	8'925
Abnahme zu 0 a	–	26 %	35 %	42 %
Metalle [Mg]	1'998	1'325	1'093	913
Abnahme zu 0 a	–	34 %	45 %	54 %

Tab. 9: Für FG-IAEA und PSI-W: Zeitliche Entwicklung des verpackten Abfallvolumens aus Tabelle 8 und Massen der metallischen Rohabfälle für die geologische Tiefenlagerung.

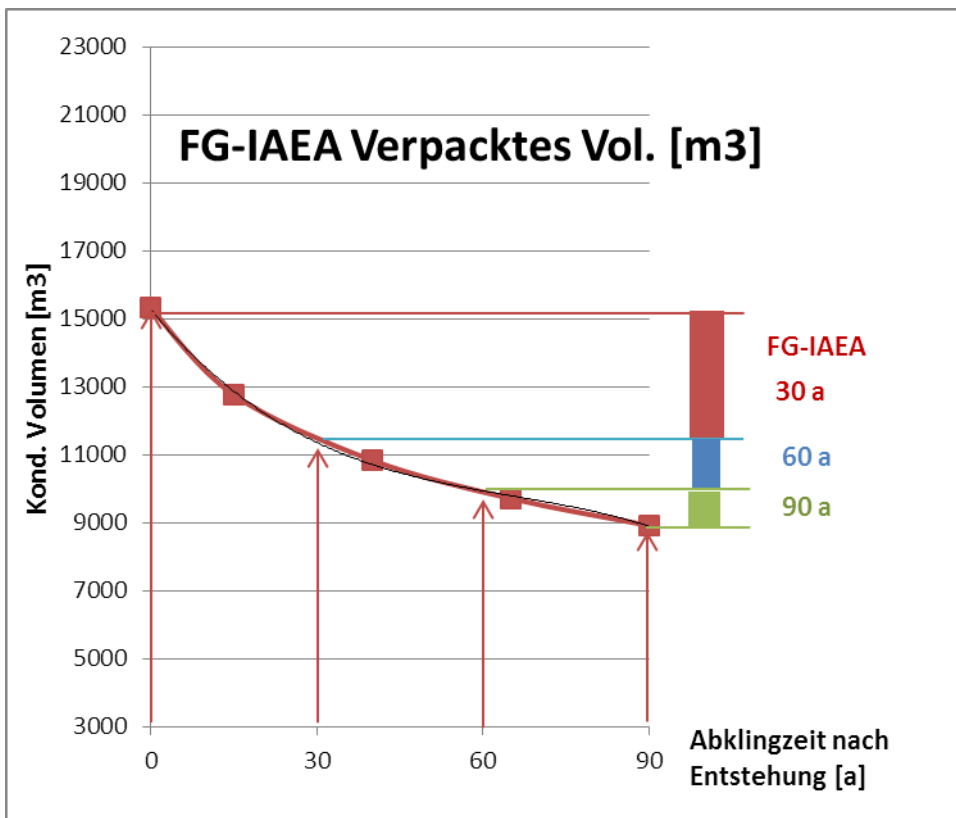


Abb. 5: Entwicklung des verpackten Abfallvolumens für die geologische Tiefenlagerung in Abhängigkeit von der Abklingzeit; Entwicklung für neue Freigrenzen (FG-IAEA, rot).

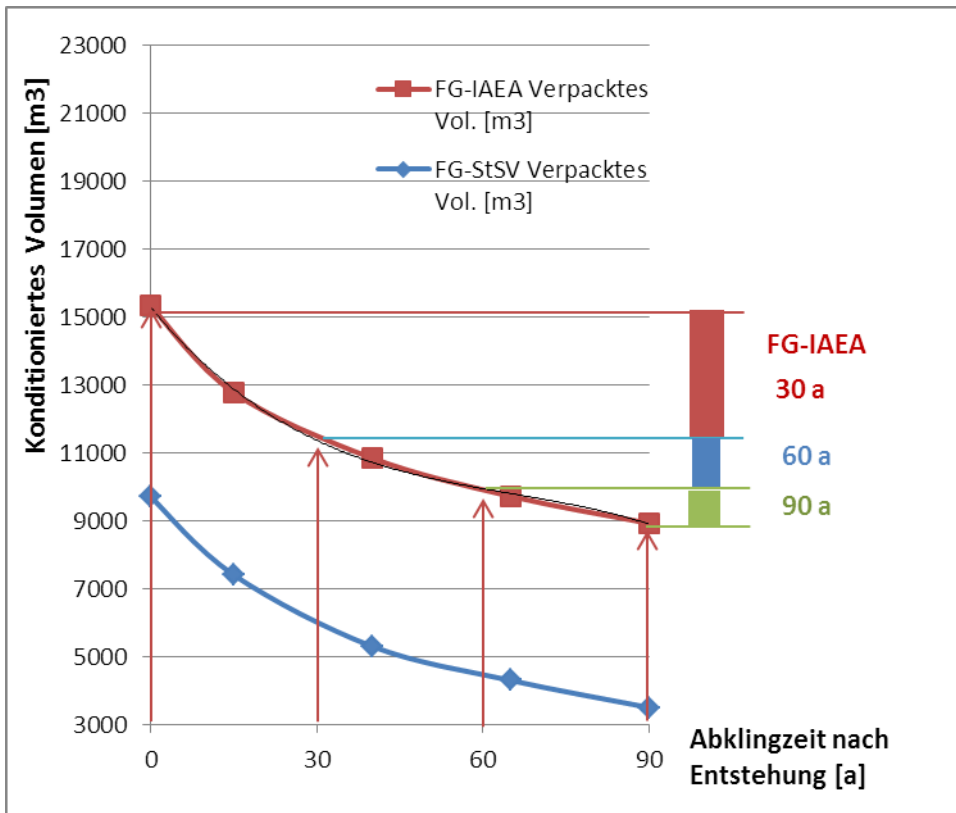


Abb. 6: Entwicklung des verpackten Abfallvolumens für die geologische Tiefenlagerung in Abhängigkeit von der Abklingzeit; Entwicklung für alte und neue Freigrenzen (FG-IAEA, rot; FG-StSV, blau).

5.4 Diskussion der Ergebnisse für PSI-Abfälle

Der Vergleich zwischen den heute gültigen Freigrenzen und den neuen IAEA-Werten zeigt für die abklingbaren Abfälle, dass für FG-IAEA nach einer 60-jährigen Abklinglagerung ein etwa gleich grosses Gesamtabfallvolumen vorliegt wie zum Zeitpunkt t_0 der FG-StSV. Anzumerken ist, dass die Abklinglagerung im Abfallmengengerüst des PSI-W schon vor dieser Studie berücksichtigt war. Die radioaktiven Abfälle zum Zeitpunkt t_0 (FG-IAEA) reduzieren sich nach 30 Jahren Abklinglagerung um ca. 26 %; durch weitere 30 bzw. 60 Jahre Abklinglagerung nehmen die Abfälle um ca. weitere 9 % bzw. 7 % ab. Hinsichtlich des metallischen Anteils (FG-IAEA) ist der Reduktionsfaktor nach 30 Jahren ca. 34 %, danach nehmen die Abfälle in den jeweils weiteren 30 Jahren noch zusätzlich um ca. 11 % bzw. ca. 9 % ab (Tab. 9 bzw. 10):

FG-IAEA	30 a	60 a	90 a
Abnahme Metalle KKW	49 %	57 %	62 %
Abnahme Metalle PSI	34 %	45 %	54 %

Tab. 10: Prozentuale geschätzte Abnahme der Metallmassen (Rohabfall) mit der Abklingzeit für die KKW und das PSI (Zusammenfassung aus Tabellen 3 und 9), relativ zum Zeitpunkt der Entstehung der Abfälle, für FG-IAEA.

Eine Aufteilung der Analyse in Betriebs- und Stilllegungsabfälle wie bei den KKW ist hier wenig sinnvoll und daher nicht erfolgt.

5.5 Zusätzliche Optimierungsmassnahmen

Neben der Abklinglagerung können prinzipiell noch andere Massnahmen zur Reduktion des Abfallvolumens beitragen. Im Besonderen sind dabei die Möglichkeiten der Reduktion metallischer Abfälle in einem geologischen Tiefenlager zu betrachten, die zur Gasproduktion durch korrosive Prozesse beitragen können (s. Abschnitt 3.1).

Dekontamination: Als erste Massnahme «an der Quelle» bietet sich ein höherer Aufwand bei der Dekontamination von Oberflächen an. Es ist jedoch zu beachten, dass:

- nach heutigem Stand der Technik bereits ein hoher Aufwand betrieben wird und bei darüber hinausgehenden Massnahmen mit einem erhöhten Anfall an Sekundärabfällen zu rechnen ist. Diese Anstrengungen sind bereits in den Untersuchungen des Kap. 5.1. berücksichtigt;
- es fraglich ist, ob bei den niedrigen Freigrenzen (s. Tab. 1) der messtechnische Nachweis für die Freimessung überhaupt noch mit einem adäquaten Aufwand erbracht werden kann;
- aktivierte Materialien, die ca. 50 % des bei der Stilllegung anfallenden Materials ausmachen, nicht dekontaminierbar sind.

Erwähnenswert ist, dass das Einschmelzen von Metallen/Stahl im Ausland angewendet wird (z. B. Schweden) und bei kontaminierten Metallen ein zusätzliches Dekontaminationspotential bietet.

Abtrennung: Als weitere Massnahme bietet sich die Trennung metallischer Materialien von nicht-metallischen Materialien (insbesondere von Beton) an. Der Grund liegt u. a. darin, dass eine mögliche Freimessung des Metalls mit dem schnell abklingenden Co-60 durch die Verbindung mit Beton mit den langsamer abklingenden Isotopen Eu-152/154 zunichte gemacht

wird. Die Technologien stehen zur Verfügung, und die Trennung wurde bei Stilllegungsprojekten bereits erfolgreich durchgeführt.

Einschmelzen: Als letzte Massnahme ist das Einschmelzen aktivierter metallischer Abfälle mit hoher spezifischer Oberfläche in kompakte Giesslinge zu betrachten. Dadurch wird zwar nicht die Masse der in ein geologisches Tiefenlager eingebrachten Abfälle reduziert, jedoch das für die Gasproduktionsrate relevante Oberflächen/Masse-Verhältnis (speziell für dünnwandige Rohre und Platten). Dieses Verfahren wird im In- und Ausland bisher nur für vergleichsweise kleine Mengen Sondermetalle wie etwa Al⁹, Pb¹⁰, Cu¹¹ angewendet.

5.6 Lager für Abklinglagerung

Unabhängig von zusätzlichen Optimierungsmassnahmen bietet sich – speziell bei der Revision der Freigrenzen für Radionuklide – die Nutzung einer Abklinglagerung an, um die Abfallvolumina, insbesondere der metallischen Materialien, sowohl im Hinblick auf die Zwischenlagerung als auch die geologische Tiefenlagerung zu reduzieren. Der Zeitpunkt, bis zu dem ein Abklinglager betrieben werden muss, ergibt sich im Kernenergiebereich aus der Laufzeit des «jüngsten» KKW und der maximal zulässigen Abklingzeit. Für eine Betriebszeit von 50 Jahren, einer Nachbetriebszeit von 5 Jahren und einer Stilllegungsperiode von ca. 12 Jahren fallen für das KKW Leibstadt im Jahr 2050 die letzten radioaktiven Materialien/Abfälle an. Bei einer zulässigen Abklingzeit von X Jahren müsste ein Abklinglager bis «2050 + X» Jahre zur Verfügung stehen, also beispielsweise bis 2080 bei 50 Jahren Betriebszeit und einer maximalen Abklingzeit von 30 Jahren.

Bei einer fixen Abklingzeit von 30 Jahren müsste Material, das aus der Stilllegung eines älteren KKW's oder eines Beschleunigers im Jahr 2030 anfällt, spätestens im Jahr 2060 freigemessen oder ansonsten in ein geologisches Tiefenlager oder Zwischenlager verbracht werden; unabhängig davon, dass es eventuell nach weiteren 20 Jahren Lagerung in einem ohnehin bis 2080 zur Verfügung stehenden Abklinglager freimessbar wäre. Wenn es hingegen möglich ist, die zur Verfügung stehende Zeit konsequent zu nutzen, würde dies zu einer weiteren Reduktion von Abfällen im Tiefenlager beitragen, ohne dass dies zu Einbussen an Sicherheit oder einer Gefährdung von Mensch und Umwelt führen würde.

Auf Grund einer ersten Abschätzung für alle Materialien der KKW und des PSI ist mit einer maximal notwendigen Kapazität eines Abklinglagers von ca. 10 000 m³ bei einer maximalen Abklingzeit von 30 Jahren zu rechnen (bei Lagerung der Rohmaterialien in üblichen Betoncontainern). Je nach tatsächlichen Terminen für die Ausserbetriebnahme und tatsächlichem Anfall der Stilllegungsabfälle sind Szenarien denkbar, bei denen zumindest für den Anteil der KKW die bereits existierenden Zwischenlagervolumina hierfür ausreichend sind. Somit wären keine zusätzlichen Lagerkapazitäten für die Abklinglagerung nötig.

5.7 Risiken einer verlängerten Abklinglagerung

Ungeachtet der Zweckmässigkeit einer langfristigen Abklinglagerung gilt es jedoch diesbezüglich auch einige Unwägbarkeiten zu diskutieren. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Freigrenzen künftig weiter verschärft werden oder dass das Prinzip der Freimessung gänzlich verboten wird, wie es in anderen Ländern der Fall ist, z. B. Frankreich. Damit würde das ursprüngliche Abklinggut zu radioaktivem Abfall und müsste als solches entsorgt werden. Es müsste juristisch abgeklärt werden, ob die ursprüngliche Eigentümerschaften in diesem Fall

⁹ Aluminium

¹⁰ Blei

¹¹ Kupfer

noch zur Entsorgung verpflichtet werden könnten, zumal die entsprechenden juristischen Personen möglicherweise nicht mehr belangt werden könnten bzw. zu erwägen ist, dass sich die entsprechenden Gesellschaften aufgelöst haben könnten.

Um derartigen Unwägbarkeiten zu begegnen, wären Massnahmen zur Abdeckung möglicher finanzieller Folgen vorzusehen. Zudem müssten unter Umständen neue Entsorgungspfade für diese Abfälle gefunden werden.

In Anbetracht der Unsicherheiten über die Zukunft kommerzieller Betriebe (Industrie), in welchen die radioaktiven Abfälle anfallen, kommt dort eine Abklinglagerung während mehr als 30 Jahren nicht in Frage.

Im Hinblick auf eine langfristige Abklinglagerung von mehr als 30 Jahren wären die gesetzlichen Grundlagen zu revidieren und entsprechende Anforderungen an Auslegung und Betrieb eines Abklinglagers zu definieren und festzulegen. Dabei dürften insbesondere die Fragen zur Standortwahl sowie zum Betrieb bzw. Bewilligung langwierige Diskussionen und Entscheidungsfindungsprozesse auslösen. In diesem Zusammenhang wäre schliesslich auch abzuklären, wie ein langfristiges Abklinglager aus den obigen Überlegungen mit der schweizerischen Gesetzgebung vereinbar wäre.

Diesen Risikoüberlegungen ist eine Abklinglagerung von 30 Jahren, welche bereits durch die existierende Rechtslage abgedeckt ist, gegenüber zustellen. Mit der heute geltenden Abklingdauer lässt sich die Zunahme der Abfälle zum grössten Teil kompensieren, längere Abklingzeiten tragen hierzu nicht mehr wesentlich bei.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- I. Die Umsetzung der neuen IAEA-Freigrenzen würden in der Schweiz insgesamt zu einer Volumenzunahme der endzulagernden schwach- und mittelaktiven Abfälle im Vergleich mit den bisherigen Freigrenzen gemäss StSV führen:

Abklingdauer	0 Jahre	30 Jahre
KKW - Betrieb	11 %	1 %
KKW - Stilllegung	112 %	26 %
Forschung - Stilllegung	58 %	91 %

Tab. 11: Volumenzunahme der Abfallmengen in Prozent

- II. Für die Stilllegungsabfälle der KKW – für die Abfälle des PSI-West sind Abklingzeiten schon berücksichtigt – kann die infolge der neuen Freigrenzen entstehende Volumenzunahme durch eine Abklinglagerung von bis zu 30 Jahren praktisch vollständig kompensiert werden.
- III. Abklingzeiten von mehr als 30 Jahren tragen zur Reduktion der Abfallvolumina nicht mehr wesentlich bei.
- IV. Mit einer Abklinglagerung von 30 Jahren werden die Metallmassen sowohl der KKW- wie der PSI-Abfälle um etwa einen Drittel bis die Hälfte reduziert. Längere Abklingzeiten tragen zur Reduktion der Metallmassen nicht wesentlich bei.
- V. Die konsequente Abklinglagerung über 30 Jahre führt zu einer massgeblichen Reduktion potenziell gasbildender Materialien in den zu entsorgenden Abfällen.
- VI. In den Stilllegungsprojekten der Kernkraftwerke und der Forschungsanlagen ist die Abklinglagerung über 30 Jahre einzuplanen.