

**Status quo der Lagerung
C-14-haltiger Abfälle aus deutschen
Hochtemperatur- und
Forschungsreaktoren und
Strategie zu deren künftigen Endlagerung**

Abschlussbericht

**Status quo der Lagerung
C-14-haltiger Abfälle aus deutschen
Hochtemperatur- und
Forschungsreaktoren und
Strategie zu deren künftigen Endlagerung**

Abschlussbericht

Dörr S., Bollingerfehr, W., Filbert, W.

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 2014

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02E11233 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Zusammenfassung

In deutschen Forschungsreaktoren und in den beiden Hochtemperaturreaktoren (AVR, THTR 300) wurde Graphit bzw. Kohlestein als Reflektor- und/oder Moderatormaterial eingebaut. Dieser Graphit/Kohlestein enthält aufgrund der Aktivierung des enthaltenen C-13 und der im Material vorkommenden Verunreinigungen nicht unerhebliche Mengen an C-14, H-3 und Co-60.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde deshalb zunächst das Mengengerüst des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren ermittelt. Anschließend erfolgte eine Beschreibung der geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung, zum Transport und zur Endlagerung. Die Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Graphit/Kohlestein diente als Basis für die Entwicklung von Lösungsansätzen für die Konditionierung und Verpackung des Graphits/Kohlesteins im Hinblick auf eine Einlagerung im Endlager Konrad für Graphit aus THTR, Forschungsreaktoren sowie den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR. Für den Graphit/Kohlestein aus dem AVR wurden Lösungsansätze für eine Einlagerung in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle erarbeitet.

Das in diesem Bericht beschriebene Mengengerüst wurde aus den Angaben der Ablieferungspflichtigen sowie eigener Recherchen ermittelt. Für die Endlagerung in Deutschland ist der Graphit aus

- dem Ausbildungskernreaktor (AKR-2)
- der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR)
- dem Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)
- dem Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)
- den Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2 (FRG-1/-2)
- dem Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN)
- dem Forschungsreaktor Jülich 2 (FRJ-2, DIDO)
- dem Forschungsreaktor München (FRM)
- dem Forschungsreaktor Neuherberg (FRN),
- dem Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)
- dem Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300)
- und weiteren Forschungsreaktoren (z.B. Forschungsreaktor Mainz (FRMZ))

zu berücksichtigen. In der Tabelle 1-1 ist das Mengengerüst des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren aufgelistet.

Tabelle 1-1 Mengengerüst des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren

Reaktor	Masse [Mg]	Volumen [m ³]	Aktivitätsangaben
AKR-2	1,3	0,77	Nicht vorhanden
AVR	364 ¹	455 ¹	Vorhanden
AVR	65 ² / 158 ³	38,7 ² / 101,9 ³	Vorhanden
FMRB	1,498 ⁴	0,88 ⁴	C-14 und H-3
FRF	6,35 ⁵	3,7 ⁵	C-14 und H-3
FRG-1/-2	11,11	5,25	Nicht vorhanden
FRJ-1	12,914	7,6	Nicht vorhanden
FRJ-2	30	17,7	Nicht vorhanden
FRM	0,2478	0,14	Nicht vorhanden
FRN	27,7	15,4	Co-60, Cs-134, Eu-153
RFR/RRR	0,2967 0,096	1,75 0,06	Vorhanden
THTR 300	551,123 63,021 ⁶	324,19 37,07 ⁶	C-14 und H-3
Weitere	13	7,65	Nicht vorhanden

¹: im Porenleichtbeton gebundener Graphitstaub und Kernbrennstoff

²: Graphit

³: Kohlestein

⁴: verpackt in ein 400-l-Fass und fünf 200-l-Fässern

⁵: verpackt in 30 200-l-Fässer

⁶: Graphit- und Absorberelemente

Die Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Zwischenlagerung ergab, dass die Genehmigung für ein Zwischenlager sehr individuell sein kann. Es können Behälter und/oder Aktivitäten für ein Zwischenlager genehmigt werden, bei der eine Beförderung/Transport und/oder eine Endlagerung nicht möglich ist. Je nachdem, für welches Inventar das Lager ausgelegt werden soll, ist eine Genehmigung gemäß § 6 AtG oder eine Umgangsgenehmigung gemäß § 7 StrlSchV erforderlich. Sollen Kernbrennstoffe in dem Zwischenlager aufbewahrt werden, so ist eine Genehmigung gemäß § 6 AtG erforderlich. Die Genehmigungen für die einzelnen Zwischenlager in Deutschland sind und verbleiben in der Obhut der Betreiber. Damit liegen für diese Studie die Genehmigungsbedingungen für die Zwischenlager nicht vor. Insofern ließ die Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung des vorgenannten Abfallmengengerüst keine Aussage darüber zu, ob der Graphit/Kohlestein in den dafür vorgesehenen Zwischenlagern gelagert werden kann. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine Zwischenlagerung der graphit-/kohlesteinhaltigen Abfälle möglich ist, wie bereits der eingelagerte Graphit des FMRB im Zwischenlager der PTB in Braunschweig belegt.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Transport zeigen, dass es vor allem auf den korrekt ausgewählten Behälter-Typ ankommt. Wenn der Behälter-Typ passend für den Aktivitätsinhalt ist und darüber hinaus noch die Grenzwerte für die Ortsdosisleistung und die Kontamination eingehalten werden, ist ein Transport möglich. Der Graphit/Kohlestein kann befördert werden, wenn der Behälter mit dem passenden Versandstücktyp gewählt wurde. Sollte die Ortsdosisleistung zu hoch sein, so können selbstabschirmende Behälter aus Beton

bzw. Guss oder eine Abschirmung innerhalb des Behälters aus Beton oder Blei verwendet werden.

Für die Endlagerung wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen bestehend aus AtG, StrlSchV, die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und der Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers betrachtet und analysiert. Es zeigte sich, dass vor allem bei einem Planfeststellungsbeschluss individuelle Regelungen für das jeweilige Endlager getroffen werden können, die hier am Beispiel Konrad näher erläutert wurden. Gemäß dem Planfeststellungsbeschlusses für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung müssen die radioaktiven Abfälle, die dort endgelagert werden, bestimmten Grundanforderungen entsprechen. Es gibt unterschiedliche Behältertypen, die für dieses Endlager genehmigt sind. Des Weiteren sind pro Abfallbehälter unterschiedliche, voneinander unabhängige Aktivitätsgrenzwerte für den bestimmungsgemäßen Betrieb, für Störfälle, für die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und der Kritikalitätssicherheit einzuhalten. Bei den Aktivitätsgrenzwerten für den bestimmungsgemäßen Betrieb können diese je nach Eigenschaft des Radionuklides unterschiedlich hoch sein. Darüber hinaus existieren für das Endlager Konrad maximale Aktivitätsgrenzwerte für einzelne Radionuklide. In das Endlager Konrad dürfen maximal 4,0 E14 Bq an C-14 eingelagert werden.

Der konkrete Abgleich mit den Endlagerungsbedingungen Konrad ergab, dass der Graphit/Kohlestein die Grundanforderungen für Abfallprodukte erfüllt. Es zeigte sich aber auch, dass die Bestimmungen zur maximalen C-14-Aktivität eines Behälters für den bestimmungsgemäßen Betrieb schwierig werden könnte. Der Ablieferungspflichtige muss den Nachweis vorlegen, in welcher flüchtigen Form das C-14 im Abfallprodukt vorliegt. Anhand der Höhe des Anteils an flüchtigem C-14 im Abfallprodukt, wird die maximale Aktivität pro Behälter bestimmt. Im Extremfall würde das bedeuten, dass die maximale Aktivität an C-14 nicht in das Endlager Konrad verbracht werden kann, wenn der gesamte C-14-haltige Abfall in einer unspezifizierten flüchtigen Form eingelagert würde. Ansonsten würde das maximal einlagerbare Volumen von 303.000 m³ für das Endlager um mehr als das 4-fache überschritten. Insofern ist die maximale für das Endlager Konrad genehmigte Aktivität für das C-14 nur dann ausschöpfbar, wenn die spezifizierte flüchtige Form des C-14 $< 1\%$ ist. Das heißt, für alle C-14 haltigen Abfälle muss die flüchtige Form spezifiziert werden. Da diese spezifizierte Form bisher nicht festgelegt wurde, wurden bei der Entwicklung der Verpackungs- und Behälterkonzepte alle möglichen spezifizierten Formen des C-14 berücksichtigt.

Obwohl nicht bei allen Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren die Aktivitäten bekannt waren, wurde davon ausgegangen, dass der gesamte Graphit/Kohlestein aus Tabelle 1-1 endgelagert werden muss. Ein Abgleich mit den Endlagerungsbedingungen Konrad zeigte, dass der Graphit des FMRB und des FRF derzeit alleine aufgrund seiner Verpackung die Endlagerungsbedingungen nicht erfüllen. Er muss deshalb in Behälter, die für das Endlager Konrad zugelassen sind, umverpackt werden. Da bei dem AKR-2, dem FMRB, dem FRG-1/-2, dem FRJ-1, dem FRJ-2, dem FRM, dem FRN, dem THTR 300 und den weiteren Reaktoren keine Aktivitäten oder nur Aktivitäten für einige Radionuklide bekannt sind, kann bei diesem Graphit keine Aussage darüber getroffen werden, ob der Graphit die Endlagerungs-

bedingungen Konrad erfüllen kann. Der Graphit des FRF ist laut Aussage des Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz endlagerfähig im Endlager Konrad. Der Graphit aus dem RFR/RRR, der bei der VKTA lagert, erfüllt die Endlagerungsbedingungen Konrad. Der im Porenleichtbeton eingebundene Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR erfüllt die Endlagerungsbedingungen Konrad ebenso, wenn er in Behälter der ABK II verpackt wird. Der Graphit/Kohlestein aus dem AVR kann aufgrund seiner hohen C-14-Aktivität nicht im Endlager Konrad eingelagert werden. Endlagerungsbedingungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente existieren derzeit noch nicht. Deshalb ist eine Bewertung noch nicht möglich. Es wird empfohlen, bei der Entwicklung solcher Endlagerungsbedingungen/Annahmebedingungen, den C-14 haltigen Graphit/Kohlestein des AVR mit zu berücksichtigen.

Da in Deutschland kein Konditionierungs- und Verpackungskonzept für den zu entsorgenden Graphit/Kohlestein existiert, wurde im ersten Ansatz Kredit vom Konditionierungs- und Verpackungskonzept der Nuclear Decommissioning Authority (NDA) in Großbritannien genommen. Aus diesem Grund wurden in diesem Vorhaben als Endlagerbehälter Container aus Baustahl oder bei weniger Abfallvolumen Gussbehälter verwendet. Sollten die Dosisleistungen nicht eingehalten werden, so ist eine zusätzliche Abschirmung der Behälter mit Beton bzw. Blei möglich. Die Hohlräume des Behälters werden mit Beton verfüllt. Auf dieser Grundlage wurden für alle Reaktoren die Anzahl der Endlagerbehälter bei ggf. unterschiedlich spezifizierter flüchtiger Form des C-14 ermittelt. In der Tabelle 1-2 sind für die einzelnen Reaktoren die vorgeschlagenen Endlagerbehältertypen, die Anzahl der Behälter, sowie die Gesamtvolumina dargestellt.

Der Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren ist nicht der einzige C-14-haltige Abfall, der im Endlager Konrad endgelagert werden soll. Neben diesem Graphit/Kohlestein sind auch Verdampferkonzentrate, Ionenaustauscherharze und Kerneinbauten sowie der Reaktordruckbehälter(RDB)-Grundkörper aus allen Leistungsreaktoren als C-14-haltiger Abfall zu entsorgen. Für die Kerneinbauten und den RDB-Grundkörper sind die Aktivitäten bekannt. Für die Verdampferkonzentrate und Ionenaustauscherharze nicht. Bei den Kerneinbauten und dem RDB-Grundkörper sind die Aktivitäten an C-14 so hoch, dass die Kerneinbauten und RDB-Grundkörper aller DWR und SWR die maximal im Endlager Konrad einlagerbare Aktivität um ein Vielfaches überschreiten. Dies zeigt, dass nicht der gesamte C-14-haltige Abfall, der in Deutschland zu entsorgen sein wird, im Endlager Konrad eingelagert werden kann. Eine abschließende Bewertung, ob und in welcher Menge der Graphit aus dem THTR 300 und den Forschungsreaktoren sowie der im Porenleichtbeton gebundene Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR im Endlager Konrad eingelagert wird, ist derzeit nicht möglich. Dies hängt davon ab, wie die Energieversorgungsunternehmen und die Öffentliche Hand die ihnen bisher zugeordneten Anteile an den Abfallgebindevolumina bzw. am Aktivitätsinventar auf die einzelnen Abfallarten aufteilen.

Die Untersuchungen zu dem Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren hat gezeigt, dass die Masse dieser Abfallart recht präzise ermittelt werden konnte, die Aktivitäten jedoch nur zum Teil. Es konnte auch festgestellt werden, dass ein Transport und eine Zwischenlagerung des Graphits/Kohlsteins möglich erscheint, auch wenn für die

Zwischenlagerung die einzelnen Genehmigungen nicht öffentlich zugänglich sind. Hinsichtlich der Endlagerung wurde festgestellt, dass eine Einlagerung des Graphits aus dem THTR 300, den Forschungsreaktoren sowie den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR im Endlager Konrad prinzipiell möglich ist, wenn die flüchtige Form des C-14 < 1 % ist. Für den Graphit/Kohlestein des AVR muss eine Einlagerung in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in Betracht gezogen werden.

Tabelle 1-2 **Vorschlag zu Typ und Anzahl von Endlagerbehältern für den Graphit/Kohlestein aus deutschen Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren**

Reaktor	Endlagerbehältertyp	Anzahl	Gesamtvolumen [m ³]
Einlagerung im Endlager Konrad			
AKR-2	Gussbehälter Typ II ¹	2 ¹	2,6 ¹
	Container Typ ²	1 ²	1,6 ²
AVR	Container Typ V ³	47 ³	512,3 ³
	Container Typ I ⁴	297 ⁴	1.158,3 ⁴
	Gussbehälter Typ I ⁵	2.962 ⁵	2.073,4 ⁵
FMRB	Container Typ I/II ¹	1/1 ¹	3,9/4,6 ¹
	Container Typ VI ²	1 ²	5,4 ²
	Gussbehälter Typ I ⁵	9 ⁵	6,3 ⁵
FRF	Container Typ III ³	2 ³	17,4 ³
	Container Typ III ⁴	2 ⁴	17,4 ⁴
	Gussbehälter Typ II ⁵	17 ⁵	22,1 ⁵
FRG-1/-2	Container Typ IV	1	7,4
FRJ-1	Container Typ V	1	10,9
FRJ-2	Container Typ V	2	21,8
FRM	Gussbehälter Typ I	1	0,7
FRN	Container Typ III	2	17,4
RFR/RRR	Container Typ I ⁶	1 ⁶	3,5 ⁶
	Gussbehälter Typ I ^{4,7}	1 ^{4,7}	0,7 ^{4,7}
	Gussbehälter Typ I ^{5,7}	6 ^{5,7}	4,2 ^{5,7}
THTR 300⁸	Container Typ I ³	278 ³	1.084,2 ³
	Gussbehälter Typ I ⁴	2.778 ⁴	1.944,6 ⁴
	Gussbehälter Typ I ⁵	27.778 ⁵	19.444,6 ⁵
THTR 300⁹	Container Typ I ³	33 ³	128,7 ³
	Gussbehälter Typ I ⁴	322 ⁴	225,4 ⁴
	Gussbehälter Typ I ⁵	3.212 ⁵	2.248,4 ⁵
Weitere	Container Typ V	1	10,9
Einlagerung im Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente			
AVR	Container Typ IV	73	540,2

¹: Graphitblöcke getrennt in einen Behälter verpackt

²: Graphitblöcke zusammen in einen Behälter verpackt

³: bei C-14 in spezifizierter flüchtiger Form < 1 %

⁴: bei C-14 in spezifizierter flüchtiger Form > 1 % und < 10 %

⁵: bei C-14 in unspezifizierter flüchtiger Form

⁶: Blöcke VKTA0004802 bis VKTA0004806

⁷: Block VKTA0003418

⁸: Graphit des THTR 300

⁹: Graphit- und Absorberelemente

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Aktuelle Bestandsaufnahme des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins	11
2.1 Ausbildungskernreaktor (AKR-2) Dresden	12
2.2 Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) Jülich	13
2.3 Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)	17
2.4 Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)	17
2.5 Forschungsreaktor Geesthacht 1 und 2 (FRG-1 und FRG-2)	17
2.6 Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN)	18
2.7 Forschungsreaktor Jülich 2 (FRJ-2, DIDO)	18
2.8 Forschungsreaktor München (FRM)	18
2.9 Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)	18
2.10 Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)	19
2.11 Siemensunterrichtsreaktoren (SUR)	23
2.12 Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300) Hamm-Uentrop	23
2.13 Weitere Forschungsreaktoren	25
3 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung, zum Transport und zur Endlagerung	27
3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung	27
3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen zum Transport	29
3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Endlagerung	34
3.4 Zusammenfassende Bewertung	56
4 Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Graphit/Kohlestein	57
4.1 Graphit aus dem Ausbildungsreaktor Dresden (AKR-2)	58
4.2 Graphit/Kohlestein aus dem Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) Jülich	59
4.3 Graphit aus dem Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)	60
4.4 Graphit aus dem Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)	61

4.5	Graphit aus der Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2 (FRG-1/-2), Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN), Jülich 2 (FRJ-2, DIDO) und München (FRM)	61
4.6	Graphit aus dem Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)	62
4.7	Graphit aus dem Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und dem Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)	62
4.8	Graphit aus dem Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300)	63
4.9	Graphit aus weiteren Forschungsreaktoren	64
5	Auswahl und Beschreibung von möglichen Konditionierungsverfahren und Behälterkonzepten	65
5.1	Graphit aus dem Ausbildungsreaktor Dresden (AKR-2)	66
5.2	Graphit/Kohlestein aus dem Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich (AVR)	67
5.3	Graphit aus dem Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)	69
5.4	Graphit aus dem Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)	71
5.5	Graphit aus den Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2 (FRG-1 und FRG-2), Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN), Jülich 2 (FRJ-2, DIDO) und München (FRM)	72
5.6	Graphit aus dem Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)	74
5.7	Graphit aus dem Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und dem Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)	75
5.8	Graphit aus dem Thorium-Hochtemperaturreaktor Hamm-Uentrop (THTR 300)	76
5.9	Graphit aus weiteren Forschungsreaktoren	79
5.10	Weitere C-14-haltige radioaktive Abfälle	80
	Tabellenverzeichnis	85
	Abkürzungsverzeichnis	89
	Literaturverzeichnis	93
	Anhang	97

1 Einleitung

In deutschen Forschungsreaktoren und in den beiden Hochtemperaturreaktoren (AVR und THTR 300) wurde Graphit bzw. Kohlestein als Reflektor- und/oder Moderatormaterial eingebaut. Dieser Graphit/Kohlestein enthält aufgrund der Aktivierung des C-13 und der im Material vorkommenden Verunreinigungen nicht unerhebliche Mengen an C-14, H-3 und Co-60. Wegen des hohen C-14-Aktivitätsinventars gibt es bislang kein konkretes Konditionierungs- und Verpackungskonzept für den Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren. Darüber hinaus ist noch nicht abschließend geklärt, ob der Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen kann.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens sollte eine aktuelle Beschreibung des in Deutschland zu entsorgenden Graphit/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren erstellt, die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung, zum Transport und zur Endlagerung recherchiert und ein Abgleich der Massen und Aktivitäten des zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins mit den rechtlichen Rahmenbedingungen erfolgen. Auf dieser Basis sollten dann Lösungsansätze für die Konditionierung und Verpackung des Graphits/Kohlesteins im Hinblick auf eine Einlagerung im Endlager Konrad für den Graphit aus dem THTR 300 und den Forschungsreaktoren sowie den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR hergeleitet werden. Für den Graphit/Kohlestein des AVR sollte eine Strategie im Hinblick auf eine Einlagerung in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente erarbeitet werden.

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse wurden in fünf Schritten erarbeitet.

Im ersten Schritt erfolgte die Bestandsaufnahme von Art und Menge des Graphits/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren, die für eine Endlagerung in Deutschland zu berücksichtigen ist. Im zweiten Schritt wurde ausführlich beschrieben, welche rechtliche Regelungen und Rahmenbedingungen für die Zwischenlagerung, für den Transport und für die Endlagerung der graphit-/kohlesteinhaltigen Abfälle in Deutschland gelten. Im dritten Schritt wurden die ermittelten Mengen- und Aktivitätsinventare der einzelnen Reaktoren mit den rechtlichen Rahmenbedingungen abgeglichen. Im vierten Schritt erfolgte basierend auf den vorherigen Ergebnissen die Beschreibung von möglichen Konditionierungsverfahren und Verpackungskonzepten für den Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren sowie dem im Porenleichtbeton eingebundenen Kernbrennstoff und dem Graphitstaub aus dem AVR mit dem Ziel der Einhaltung der Anforderungen aus den Endlagerungsbedingungen Konrad. Für den Graphit/Kohlestein aus dem AVR wurden Konditionierungsverfahren und Behälterkonzepte für eine Einlagerung in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente entwickelt. Im fünften und letzten Schritt wurden die Ergebnisse zusammengefasst.

2 Aktuelle Bestandsaufnahme des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins

In deutschen Forschungsreaktoren und in den beiden Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR 300 wurden Graphit bzw. Kohlestein als Reflektor- und/oder Moderatormaterial eingebaut. Dieser Graphit/Kohlestein enthält aufgrund der Aktivierung des enthaltenen C-13 und der im Material vorkommenden Verunreinigungen erhebliche Mengen an C-14, H-3 und Co-60. Aufgrund der hohen Aktivitätsinventare gibt es bislang kein konkretes Konditionierungs- und Verpackungskonzept für den Graphit/Kohlestein.

In der Tabelle 2-1 sind die deutschen Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren aufgelistet, in denen Graphit bzw. Kohlestein zum Einsatz kam /Bach 2004/, /TUM 2014/:

Tabelle 2-1 Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren in denen Graphit/Kohlestein zum Einsatz kam

Anlage	Standort	Einsatzort bzw. - zweck
AKR	Dresden	Reflektor
AVR	Jülich	Core
FMRB	Braunschweig	Reflektor
FRG-1	Geesthacht	Reflektor
FRH ¹	Hannover	Reflektor
FRJ-1 (MERLIN)	Jülich	Reflektor
FRJ-2 (DIDO)	Jülich	Reflektor
FRM	München	Reflektor
FRMZ ¹	Mainz	Reflektor
FRN	Oberschleißheim	Reflektor
RFR	Rosendorf	Moderator
RRR	Rosendorf	Reflektor
SAR ¹	Garching	Moderator und Reflektor
SNEAK ¹	Karlsruhe	Reflektor
STARK ¹	Karlsruhe	Reflektor
SUR Aachen	Aachen	Reflektor
SUR Berlin	Berlin	Reflektor
SUR Bremen	Bremen	Reflektor
SUR Darmstadt	Darmstadt	Reflektor
SUR Furtwangen	Furtwangen	Reflektor
SUR Hamburg	Hamburg	Reflektor
SUR Hannover	Hannover	Reflektor
SUR Karlsruhe	Karlsruhe	Reflektor
SUR Kiel	Kiel	Reflektor
SUR Munich	München	Reflektor
SUR Stuttgart	Stuttgart	Reflektor
SUR Ulm	Ulm	Reflektor
TRIGA HD I ¹	Heidelberg	Reflektor
TRIGA HD II ¹	Heidelberg	Reflektor
THTR 300	Hamm-Uentrop	Core

¹: Weitere Forschungsreaktoren (s. Kapitel 2.13)

In den folgenden Kapiteln werden die durch eine Abfrage bei den Ablieferungspflichtigen ermittelten Massen des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins beschrieben. Bei den Mengenangaben handelt es sich um den Graphit/Kohlestein, der für eine Endlagerung in Deutschland zu berücksichtigen ist. Es ist möglich, dass in diesen Reaktoren mehr Graphit/Kohlestein verbaut wurde bzw. dass Reaktoren in der Tabelle 2-1 aufgelistet sind, für diese aber kein Graphit/Kohlestein für die Endlagerung zu berücksichtigen ist, da dieser Graphit/Kohlestein im Rahmen der Stilllegung des Reaktors freigegeben werden konnte.

2.1 Ausbildungskernreaktor (AKR-2) Dresden

Im Ausbildungskernreaktor AKR-2 (ehemals AKR) der Technischen Universität Dresden wird der Graphit permanent als Neutronenreflektor innerhalb der Anlage und zeitweise bei Bedarf als Experimentiermaterial eingesetzt /TUDresden 2013/.

Die Spaltzone des AKR-2 ist allseitig zylinderförmig von einem Graphit-Neutronenreflektor umgeben, sowohl in radialer als auch in axialer Richtung. Einschließlich des Reflektormaterials im Unterdrucksystem des Reaktortanks ergibt sich eine radiale Reflektordicke von 32 cm, der Gesamtdurchmesser des Reflektors ist 90 cm. Die axiale Reflektordicke ober- und unterhalb der Spaltzone in der Standardbeladung beträgt jeweils 20 cm. Der radiale Reflektor enthält unmittelbar am Reaktortank drei um 90° versetzte vertikale Kanäle von jeweils ca. 150 x 100 mm². Darin befinden sich die Steuerstäbe des AKR-2 /TUDresden 2013/.

Das Reflektormaterial ist Reinstgraphit vom Typ E 4030 mit einer Dichte von ρ (1,70 ± 0,05) g/cm³, bezogen Mitte der 1970er Jahre aus dem damaligen VEB Elektrokohle Berlin-Lichtenberg. Lieferunterlagen sind hierzu nicht mehr verfügbar /TUDresden 2013/.

Gemäß den Abschätzungen ist das Gesamtvolumen des Graphits im Neutronenreflektor des Reaktors ca. 0,43 m³ mit einer sich ergebenden Masse von ca. 730 kg /TUDresden 2013/.

Die Aktivität und die gespeicherte WIGNER-Energie sind im Hinblick auf

- den AKR-2 als Nullleistungsreaktor mit max. 2 W Dauerleistung,
- der damit verbundenen maximalen Neutronenflussdichte von $2,5 \times 10^7$ n/cm²·s im Zentrum des Reaktors,
- der tatsächlich erreichten Betriebszeit (Volllasttage) und
- der peripheren räumlichen Anordnung des Reflektors

vernachlässigbar gering /TUDresden 2013/.

Hinzu kommt noch ein Bestand an Graphit im Reaktorlabor als Reflektorreserve und für gelegentliche Nutzung in neutronenphysikalischen Experimenten von 0,34 m³ bzw. 570 kg, der jedoch noch nicht bzw. in geringen Mengen nur ab und zu kurzfristig im Einsatz war /TUDresden 2013/.

Nach aktuellem Stand soll der AKR-2 langfristig für Lehre und Forschung weiterbetrieben werden, so dass eine Entsorgung des vorhandenen Graphits gegenwärtig nicht absehbar ist /TUDresden 2013/.

2.2 Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) Jülich

Im AVR sind insgesamt 65 Mg bzw. 38,7 m³ an Graphit und 158 Mg bzw. 101,9 m³ an Kohlestein verbaut. Die Aktivität des Graphits bzw. Kohlesteins ist in der Tabelle 2-2 aufgelistet /AVR 2013/:

Tabelle 2-2 Aktivitätsinventar des Graphits bzw. Kohlesteins aus dem AVR

Nuklid	Aktivität im Graphit (2013) [Bq]	Aktivität im Kohlestein (2013) [Bq]
H-3	2,2 E+14	1,7 E+15
C-14	4,6 E+12	2,8 E+14
Co-60	1,7 E+12	4,2 E+13
Sr-90/Y-90	1,2 E+12	1,5 E+13
Cs-137	5,9 E+11	2,9 E+12
Eu-154	1,6 E+11	8,0 E+10
Cl-36	1,5 E+09	5,8 E+10
Summe	2,2 E+14	2,0 E+15

Als Basis für die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) hat das BfS die Anlieferungspflichtigen gebeten, dem BfS alle Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu nennen, die nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können. Im Rahmen dieser Datenerhebung hat EWN ausführliche Angaben zum AVR und den dort enthaltenen Graphit gemacht /EWN 2011/.

Der Reaktorbehälter (RB) des AVR wurde für die vorgesehene mittelfristige Zwischenlagerung mit Porenleichtbeton befüllt, hat eine Gesamtmasse von ca. 2.000 Mg und ein Außenvolumen von 925 m³. Für ihn ist eine Abklinglagerung von 30 bis 60 Jahren vorgesehen. Nach der Abklinglagerung soll der AVR-RB zerlegt werden. In der Tabelle 2-3 sind die Bestandteile und Aktivitäten des verfüllten RB mit Stand 2009 detailliert aufgeführt /EWN 2011/:

Tabelle 2-3 Bestandteile und Aktivitäten des verfüllten AVR Reaktorbehälters mit Stand 2009

Nuklid	Aktivitäts-träger I	Aktivitäts-träger II		Aktivitäts-träger III	Aktivitäts-träger IV	Aktivitäts-träger V	Gesamtaktivität [Bq]
	Graphit-staub ¹ [Bq]	Graphit-einbauten [Bq]	Kohlestein-einbauten [Bq]	metallische Einbauten [Bq]	98 g Kernbrennstoff ¹ [Bq]	10 Neutronenquellen [Bq]	
H-3	2,2 E12	2,7 E14	2,1 E15	3,3 E13	3,9 E11	-	2,4 E15
C-14	5,3 E11	4,6 E12	2,8 E14	-	2,8 E09	-	2,9 E14
Co-60	-	2,8 E12	7,1 E13	5,4 E12	5,4 E09	-	7,9 E13
Sr-90/ Y-90	2,4 E13	1,3 E12	1,6 E13	8,2 E13	4,2 E13	-	1,7 E14
Cs-137	4,5 E11	6,5 E11	3,2 E12	4,1 E13	4,0 E13	-	8,5 E13
Eu-154	9,0 E10	2,2 E11	1,1 E11	4,0 E10	5,2 E11	-	9,8 E11
Pu-241	1,6 E10	-	-	-	2,4 E12	-	2,4 E12
Cl-36	-	1,5 E09	5,8 E10	-	8,5 E07	-	6,0 E10
Pu-238	4,8 E08	-	-	-	1,1 E12	-	1,1 E12
Pu-239	5,7 E07	-	-	-	5,1 E09	-	5,2 E09
Pu-240	1,1 E08	-	-	-	1,3 E10	-	1,3 E10
U-232	4,6 E06	-	-	-	1,3 E11	-	1,3 E11
U-233	1,0 E07	-	-	-	8,6 E09	-	8,6 E09
U-235	2,0 E06	-	-	-	5,7 E06	-	5,7 E06
Am-241	6,3 E08	-	-	-	1,2 E11	-	1,2 E11
Cm-244	6,9 E07	-	-	-	2,6 E10	-	2,6 E10
Am/Be	-	-	-	-	-	7,4 E11	7,4 E11

1: im Porenleichtbeton eingebunden

Von den in den Tabellen aufgeführten Bestandteilen ist der Kohlestein aufgrund seiner C-14-Aktivität nicht im Endlager Konrad einlagerbar. Der Graphit sowie die darin eingeschlossenen Neutronenquellen und die Brennelementbruchstücke sind technisch nur sehr bedingt vom Kohlestein zu trennen. Daher werden auch diese Mengen als nicht konradgängig angesehen. Insgesamt handelt es sich hierbei um 225 Mg bzw. um ca. 140 m³. Der Rest des RB, auch der im Porenleichtbeton eingebundene Graphitstaub, soll konradgängig konditioniert und verpackt werden. Pläne hierzu liegen nicht vor. Die nicht konradgängigen Abfälle sollen gemäß EWN in 200-l-Fässer verpackt und ggf. in Konrad-Typ IV-Container zur Zwischenlagerung eingestellt werden. Insgesamt soll der Graphit/Kohlestein in ca. 1010 200-l-Fässer mit einem Volumen von insgesamt ca. 280 m³ verpackt werden /EWN 2011/.

2.3 Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)

Der FMRB ist vollständig rückgebaut. Im Zwischenlager der PTB in Braunschweig lagern die radioaktiven Abfälle aus dem Rückbau dieses Forschungsreaktors bis zu ihrer Verbringung in ein Endlager. Insgesamt beträgt die Menge an Graphit im Zwischenlager der PTB 1.498 kg. Dieser Graphit ist verpackt in fünf 200-l-Fässer und einem 400-l-Fass. Die Fässer wurden 2002 konditioniert, haben die Produktkontrolle durchlaufen und erfüllen die ERAM-Bedingungen. Die Aktivität für Tritium beträgt mit Stand 8. November 2013 1,3 E+09 Bq und die Aktivität für C-14 beträgt zu diesem Zeitpunkt 1,6 E+09 Bq /PTB 2013/.

2.4 Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)

In der Landessammelstelle Hessen (LHE) lagern 30 Stück 200-l-Fässer mit aktiviertem/kontaminiertem Graphit, die 2006 aus dem Rückbau des Forschungsreaktors Frankfurt zur Entsorgung als radioaktiver Abfall abgeliefert worden sind /HLUG 2014/.

Gemäß Deklaration des Ablieferers enthalten die 30 Fässer rund 4 E+10 Bq H-3 und ca. 3 E+09 Bq an C-14 (Bezugsdatum 31.12.2005). Die Gesamt-Bruttomasse dieser Fässer beträgt ca. 7.700 kg (Leermasse der Fässer 30 x 45 kg) /HLUG 2014/.

2.5 Forschungsreaktor Geesthacht 1 und 2 (FRG-1 und FRG-2)

Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht ist der Betreiber der beiden Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2. In den beiden Forschungsreaktoren sind die in Tabelle 2-4 dargestellten Graphitmengen verwendet worden /HZG 2014/.

Tabelle 2-4 Graphitmengen in den Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2

Einsatzort	Masse [Mg]	Volumen [m ³]
Thermische Säule	10,6	5
113 St. Graphit Reflektoren	0,51	0,25

Nach Auswertung der Betriebshistorie wurde der FRG-1 zu keinem Zeitpunkt an der Thermischen Säule betrieben. Darüber hinaus konnte durch Aktivierungsrechnung nachgewiesen

werden, dass durch den Betrieb des FRG-1 in der Strahlrohrposition die Thermische Säule nicht aktiviert werden konnte. Daher wird die Aktivität des Graphits in der Thermischen Säule als sehr gering eingeschätzt /HZG 2014/.

Die Graphit Reflektoren wurden bis 1980 am FRG-1 und FRG-2 eingesetzt. Seitdem lagern die Graphit Reflektoren im Becken. Eine Aktivitätsabschätzung ist bisher noch nicht erfolgt /HZG 2014/.

2.6 Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN)

Der Forschungsreaktor Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN) wurde zwischen 1962 und 1985 von der damaligen Kernforschungsanlage Jülich (KFA) betrieben. Der FRJ-1 hatte zwei Thermische Säulen, die sich um 180° versetzt gegenüber im Reaktorblock befanden und unter Luft betrieben wurden. Die gesamte Graphitmenge des FRJ-1 beläuft sich auf 12,914 Mg /FZJ 2014a/.

2.7 Forschungsreaktor Jülich 2 (FRJ-2, DIDO)

Der Forschungsreaktor Jülich 2 (FRJ-2, DIDO) wurde von 1962 bis 2006 mit einer maximalen thermischen Leistung von zuletzt 23 MW betrieben /FZJ 2014b/.

Der Reaktortank ist von einem Graphitreflektor mit einer Masse von 26 Mg umgeben. Der Reflektor wurde unter Helium als Schutzgas betrieben. Die Thermische Säule des FRJ-2 hat eine Masse von 4 Mg an Graphit. Insgesamt sind für den FRJ-2 30 Mg an Graphit zu berücksichtigen /FZJ 2010/.

2.8 Forschungsreaktor München (FRM)

Am Forschungsreaktor München (FRM) kam Graphit sowohl als Reflektorelement als auch als Kollimator, der zur Erzeugung eines parallelen Strahls dient, in Strahlrohren zum Einsatz /TUM 2014/.

Es wurden als Graphit-Reflektorelemente 6 Elemente mit je 2,83 kg und 22 mit je 5,60 kg verwendet /TUM 2014/. Insgesamt ist das für die Reflektoren eine Menge von 140,18 kg Graphit.

Als Kollimator in Strahlrohren wurden insgesamt 106,9 kg Graphit in vier Strahlrohren (27,1 kg, 32,2 kg, 30,0 kg und 17,6 kg) im FRM verbaut /TUM 2014/. Insgesamt sind das 247,08 kg Graphit für den FRM.

2.9 Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)

Im Jahre 1982 wurden insgesamt 27,7 Mg Graphit mit einem Volumen von 15,4 m³ im Bestrahlungsraum der horizontalen Thermischen Säule des FRN eingelagert und versiegelt. Nach den vorliegenden Unterlagen ist dieser mit Co-60, Cs-134 und Eu-152 kontaminiert.

Die zugehörigen nuklidspezifischen Aktivitäten sind in der Tabelle 2-5 dargestellt /HZM 2014/:

Tabelle 2-5 Aktivitätsinventar des Graphits bzw. Kohlesteins aus dem FRN

Nuklid	Aktivität 31.08.2014 [Bq]	Bq/g
Co-60	5,66 E+08	2,04 E+01
Cs-134	4,98 E+04	1,80 E-03
Eu-152	5,87 E+09	2,12 E+02

2.10 Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)

Der Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf (VKTA) realisiert den Rückbau der kerntechnischen Altanlagen am Forschungsstandort Dresden-Rossendorf. Die Stilllegung und der Rückbau der kerntechnischen Anlagen und Gebäuden des früheren Zentralinstituts für Kernforschung Rossendorf erfolgt bis zur „Grünen Wiese“. Die Rückbauprojekte sind der Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und die beiden Nullleistungsreaktoren RRR und RAKE.

Im RFR wurde Graphit als Moderatormaterial und im RRR als Reflektormaterial eingesetzt. Die Gesamtmenge der im VKTA befindlichen Graphitabfälle beträgt ca. 3.055 kg mit einer Gesamtaktivität von 3,99 E+09 Bq. Die detaillierten Massen und Aktivitäten des im VKTA befindlichen Graphits sind in der Tabelle 2-6 dargestellt /VTKA 2014/:

Tabelle 2-6 Graphitmengen im VKTA

	VKTA0004802	VKTA0004803	VKTA0004804	VKTA0004805	VKTA0004806	VKTA0003418	Summe
Gewicht [kg]	559	531	604	604	669	96	3.055
Am-241 [Bq]	1,86 E+02	-	-	-	-	-	1,86 E+02
Pu-239 [Bq]	-	6,54 E+03	1,21 E+03	1,33 E+02	1,98 E+02	-	8,08 E+03
U-233 [Bq]	-	7,49 E+00	-	-	-	-	7,49 E+00
U-235 [Bq]	9,37 E+01	-	-	-	-	-	9,37 E+01
U-238 [Bq]	8,43 E+02	-	-	-	-	-	8,43 E+02
Ag-108m [Bq]	-	4,79 E+00	-	-	-	-	4,79 E+00
Ar-39 [Bq]	-	1,05 E+03	1,12 E+02	2,84 E+01	1,30 E+01	-	1,20 E+03
Ba-133 [Bq]	-	5,61 E+01	6,73 E+00	1,28 E+00	-	-	6,41 E+01
Be-10 [Bq]	-	3,03 E+03	5,06 E+02	1,03 E+02	5,38 E+01	-	3,69 E+03
C-14 [Bq]	7,26 E+07	8,31 E+06	3,61 E+06	1,91 E+05	3,96 E+06	9,21 E+08	1,01 E+09
Ca-41 [Bq]	-	6,64 E+03	5,78 E+02	1,29 E+02	5,95 E+01	-	7,41 E+03
Cd-113m [Bq]	-	3,34 E+04	3,26 E+03	6,82 E+02	3,15 E+02	-	3,77 E+04
Cl-36 [Bq]	-	1,87 E+04	1,63 E+03	3,65 E+02	1,68 E+02	-	2,09 E+04
Co-60 [Bq]	2,73 E+05	1,76 E+06	1,63 E+05	3,54 E+04	1,50 E+04	2,34 E+07	2,56 E+07
Cs-134 [Bq]	2,70 E+02	3,97 E+02	5,13 E+01	9,42 E+00	3,55 E+00	-	7,31 E+02
Cs-137 [Bq]	1,01 E+04	9,62 E+03	5,64 E+03	1,87 E+02	5,22 E+03	1,22 E+06	1,25 E+06
Eu-152 [Bq]	1,40 E+06	4,87 E+05	4,56 E+04	9,51 E+03	4,25 E+03	2,08 E+04	1,96 E+06
Eu-154 [Bq]	3,41 E+04	4,23 E+04	3,81 E+03	8,26 E+02	3,67 E+02	1,64 E+04	9,77 E+04
Eu-155 [Bq]	-	4,47 E+03	4,38 E+02	9,15 E+01	4,01 E+01	-	5,04 E+03
Fe-55 [Bq]	-	8,37 E+05	7,32 E+04	1,64 E+04	6,46 E+03	-	9,33 E+05
H-3 [Bq]	5,46 E+07	2,48 E+09	2,16 E+08	4,83 E+07	2,14 E+07	8,08 E+07	2,90 E+09
Ho-166m [Bq]	-	7,22 E+01	6,80 E+00	1,44 E+00	6,77 E-01	-	8,11 E+01
Kr-85 [Bq]	-	4,43 E+02	3,87 E+01	8,65 E+00	3,83 E+00	-	4,94 E+02
Mo-93 [Bq]	-	5,32 E+02	5,06 E+01	1,07 E+01	5,06 E+00	-	5,99 E+02
Na-22 [Bq]	-	1,56 E+00	-	-	-	-	1,56 E+00
Nb-94 [Bq]	-	3,00 E+03	2,84 E+02	6,04 E+01	2,86 E+01	-	3,37 E+03
Ni-59 [Bq]	-	2,28 E+05	1,99 E+04	4,45 E+03	2,05 E+03	-	2,54 E+05

	VKTA0004802	VKTA0004803	VKTA0004804	VKTA0004805	VKTA0004806	VKTA0003418	Summe
Ni-63 [Bq]	-	2,63 E+07	2,06 E+06	4,61 E+05	2,11 E+05	-	2,64 E+07
Pu-241 [Bq]	-	1,19 E+00	-	-	-	-	1,19 E+00
Rb-87 [Bq]	-	9,26 E+01	1,06 E+02	1,06 E+02	1,16 E+02	-	4,21 E+02
Sb-125 [Bq]	-	8,49 E+01	8,34 E+00	1,78 E+00	-	-	9,96 E+01
Se-79 [Bq]	-	2,79 E+00	-	-	-	-	2,79 E+00
Sm-151 [Bq]	-	1,17 E+07	9,76 E+05	2,18 E+05	1,00 E+05	-	1,30 E+07
Sr-90 [Bq]	4,93 E+02	9,03 E+03	7,84 E+02	1,75 E+02	7,96 E+01	-	1,06 E+04
Tc-99 [Bq]	-	1,04 E+01	1,02 E+00	-	-	-	1,14 E+01
Zr-93 [Bq]	-	1,53 E+01	1,36 E+00	-	1,40 E+00	-	1,81 E+01
Ba-137m [Bq]	1,18 E+03	9,10 E+03	7,91 E+02	1,77 E+02	8,03 E+01	1,16 E+06	1,17 E+06
Cd-109 [Bq]	-	1,87 E+00	-	-	-	-	1,87 E+00
Nb-93m [Bq]	-	3,70 E+02	3,51 E+01	7,42 E+00	3,54 E+00	-	4,16 E+02
Pa-234m[Bq]	8,43 E+02	-	-	-	-	-	8,43 E+02
Pm-147 [Bq]	-	1,02 E+03	9,72 E+01	2,06E+01	8,28 E+00	-	1,14 E+03
Sn-121m [Bq]	-	3,05 E+00	-	-	-	-	3,05 E+00
Te-125m [Bq]	-	9,48 E+01	8,83 E+00	1,89 E+00	-	-	1,05 E+02
Th-231 [Bq]	9,37 E+01	-	-	-	-	-	9,37 E+01
Th-234 [Bq]	8,43 E+02	-	-	-	-	-	8,43 E+02
Tl-204 [Bq]	-	8,70 E+03	7,91 E+02	1,72 E+02	7,18 E+01	-	9,73 E+03
Y-90 [Bq]	4,93 E+02	9,02 E+03	7,84 E+02	1,75 E+02	7,96 E+01	-	1,06 E+04
Summe [Bq]							3,99 E+09

2.11 Siemensunterrichtsreaktoren (SUR)

Für den Siemensunterrichtsreaktor in Kiel teilte die Fachhochschule Kiel mit, dass kein Graphit aus dem SUR Kiel für eine Endlagerung in Deutschland zu berücksichtigen sei /FH Kiel 2013/. Von den anderen Betreibern der SUR haben wir keine Nachricht erhalten. Daher wird im Rahmen dieses Vorhabens angenommen, dass der Graphit aus den SUR freigegeben werden konnte. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass auch für die anderen SUR in Aachen, Berlin, Bremen, Darmstadt, Furtwangen, Hamburg, Hannover, Karlsruhe, München, Stuttgart und Ulm kein Graphit zu berücksichtigen ist.

2.12 Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300) Hamm-Uentrop

Im THTR 300 sind Graphitstücke in der Decke, an der Wand und im Boden des Cores verbaut worden. Es sind drei unterschiedliche Qualitäten (A, B und C) dabei verwendet worden. In den Tabellen 2-6 bis 2-8 sind die unterschiedlichen Graphitmengen des THTR 300 in den unterschiedlichen Qualitäten aufgelistet /HKG 2013/.

Tabelle 2-7 Graphitmengen der Deckensteine des THTR 300

Stücklisten Nr.:	Qualität A [kg]	Qualität B [kg]	Qualität C [kg]
001	0	7.277,3	0
002	0	7.135,0	0
003	0	4.006,8	0
004	0	12.902,4	0
005	0	1.500,0	0
006	0	4.928,0	0

Tabelle 2-8 Graphitmengen der Wandsteine des THTR 300

Stücklisten Nr.:	Qualität A [kg]	Qualität B [kg]	Qualität C [kg]
007	0	11.715,7	0
008	0	18.949,5	0
009	16.510,6	4.915,1	0
010	81.991,8	0	0
011	8.522,8	24.168,8	0
012	44.074,2	51,3	0
013	0	2.097,0	0
014	0	16.946,0	0
015	0	176.230,0	0

Tabelle 2-9 Graphitmengen der Bodensteine des THTR 300

Stücklisten Nr.:	Qualität A [kg]	Qualität B [kg]	Qualität C [kg]
016	0	6.037,75	0
017	0	2.309,30	0
018	0	216,5	0
019	0	428,3	0
020	4.473,36	0	0
021	10.477,0	0	0
022	10.707,60	0	0
023	0	0	9.583,0
024	0	0	6.509,0
025	0	0	9.252,40
026	0	0	1.237,0
027	0	0	403,0
028	0	0	1.754,0
029	66,0	868,8	939,0
030	13.188,7	0	0
031	9.429,7	0	0
032	4.655,0	0	0
033	2.716,0	0	0
034	949,3	0	0

In der Tabelle 2-10 ist aufgelistet, wieviel Graphit in den unterschiedlichen Qualitäten insgesamt in der Decke, in der Wand und im Boden eingebaut wurde.

Tabelle 2-10 Graphit des THTR in den unterschiedlichen Qualitäten

Ort	Qualität A [kg]	Qualität B [kg]	Qualität C [kg]	Summe [kg]
Deckensteine	0	37.749,50	0	37.750
Wandsteine	151.099,40	255.073,40	0	406.173
Bodensteine	56.662,66	9.860,65	29.677,40	96.201
Summe	207.762,06	302.683,55	29.677,40	540.123

Zusätzlich zu den 540.123 kg lagern noch 11.000 kg an Graphit aus dem Abbrandmessreaktor (AMR) im THTR 300. Somit beläuft sich die gesamte Menge an Graphit auf 551.123 kg. Die Aktivität dieser Menge zum Bezugszeitpunkt 1. Januar 2041 beträgt 5,00 E+12 Bq an C-14 und 1,72 E+13 Bq an H-3 /HKG 2013/.

Zusätzlich zu den eben genannten Graphitmassen sind im internen Lager des THTR 300 noch 63,021 Mg Graphit- und Absorberelemente (Kugeln) eingelagert. Die Aktivität zum Bezugszeitpunkt 1. Januar 2041 beträgt 5,78 E+11 Bq an C-14 und 3,25 E+13 Bq an H-3 /HKG 2013/.

2.13 Weitere Forschungsreaktoren

Für die folgenden Reaktoren liegen keine Angaben der Ablieferungspflichtigen vor:

- Forschungsreaktor Hannover (FRH)
- Forschungsreaktor Mainz (FRMZ)
- Siemens Argonaut Reaktor (SAR)
- Schnelle Nullenergie-Anordnung Karlsruhe (SNEAK)
- Schnell-Thermischer Argonaut-Reaktor Karlsruhe (STARK)
- Forschungsreaktor TRIGA Heidelberg I (TRIGA HD I)
- Forschungsreaktor TRIGA Heidelberg II (TRIGA HD II)

Mittels Literaturrecherche wurden für die weiteren Forschungsreaktoren Angaben zu den Graphitmassen ermittelt. Dabei wurde den Rohabfällen eine mittlere Dichte von 1,7 g/cm³ unterstellt. Die ermittelten Angaben zu den Massen weiterer Forschungsreaktoren sind in Tabelle 2-11 dargestellt /Bach2004/ /JK 2006/ /JK 2007/. Aktivitätsangaben zu diesen Reaktoren liegen nicht vor.

Tabelle 2-11 Graphitmassen der weiteren Forschungsreaktoren

Forschungsreaktor	Graphit [kg]	Graphit [m³]
TRIGA II HD	1.630	1
FRH	1.000	0,6

Für die anderen aufgelisteten Reaktoren liegen keinerlei Mengenangaben vor. Für die restlichen Reaktoren wird angenommen, dass eine Graphitmenge von insgesamt 10 Mg für die Endlagerung zu berücksichtigen ist. Somit beläuft sich die Menge an Graphit für weitere Forschungsreaktoren auf ca. 13 Mg.

3 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung, zum Transport und zur Endlagerung

Die in Deutschland geltenden Gesetze, Verordnungen und Regelungen zur Zwischenlagerung, zum Transport und zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen werden nachfolgend in der Weise zusammengefasst, dass daraus anschließend die konkreten Anforderungen für den vorgenannten Graphit/Kohlestein ableitbar sind.

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Zwischenlagerung

Da in Deutschland noch kein betriebsbereites Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente zur Verfügung steht, müssen radioaktive Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren bis zu ihrer Verbringung in ein Endlager zeitlich begrenzt in Einrichtungen über Tage zwischengelagert werden.

Je nachdem für welches Inventar das Zwischenlager ausgelegt werden soll, ist dafür eine Genehmigung gemäß § 6 des Atomgesetzes (AtG) /AtG 2013/ oder eine Umgangsgenehmigung gemäß § 7 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /StrlSchV 2012/ erforderlich.

Enthalten die aufzubewahrenden radioaktiven Abfälle Kernbrennstoffe i. S. d. § 2 AtG, bedarf es einer Aufbewahrungsgenehmigung gemäß § 6 AtG.

Nach der Definition des § 2 Abs. 3 AtG gelten für die Anwendung von Genehmigungsvorschriften nach dem AtG oder nach den aufgrund des AtG erlassenen Rechtsverordnungen Stoffe, in denen der Anteil der Isotope Uran 233, Uran 235, Plutonium 239 und Plutonium 241 insgesamt 15 g oder die Konzentration der genannten Isotope 15 g / 100 kg nicht überschreitet, als sonstige radioaktive Stoffe. Dies gilt jedoch nicht für verfestigte hochradioaktive Spaltproduktlösungen aus der Aufarbeitung von Kernbrennstoffen.

Hieraus folgt, dass eine Aufbewahrungsgenehmigung gemäß § 6 AtG erforderlich ist, wenn das Lager Abfallgebinde aufnehmen soll, deren Inventar Stoffe enthält, in denen der Anteil der Isotope U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 insgesamt 15 g oder die Konzentration der Isotope 15 g / 100 kg überschreitet.

Die § 6 AtG-Genehmigung ist zu erteilen, wenn die in § 6 Abs. 1 AtG genannten Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt sind. Hierzu zählen

1. Zuverlässigkeit des Antragsstellers und der verantwortlichen Personen sowie Fachkunde der verantwortlichen Personen
2. Einhaltung der erforderlichen Schadensvorsorge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik
3. Einhaltung der erforderlichen Vorsorge zur Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen

4. Gewährleistung des erforderlichen Schutzes gegen Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter

Des Weiteren muss ein Bedürfnis für die Aufbewahrung vorliegen. Dies ist in jedem Fall vorhanden, solange kein betriebsbereites Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland existiert.

Die Genehmigungsbehörde für eine Genehmigung gemäß § 6 AtG ist gemäß § 23 Abs. 1 Nr. 4 AtG das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Die Aufsicht über das Lager übernimmt nach Erteilung der Genehmigung die zuständige Landesbehörde.

Enthalten die aufzubewahrenden Gebinde keine Kernbrennstoffe i. S. d. § 2 Abs. 3 AtG, sondern ausschließlich sonstige radioaktive Stoffe, d.h. Stoffe, in denen der Anteil der Isotope U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 insgesamt 15 g oder die Konzentration 15 g / 100 kg nicht überschreitet, so bedarf es bei dem Lager einer Umgangsgenehmigung gemäß § 7 StrlSchV.

Die § 7 StrlSchV-Genehmigung ist zu erteilen, wenn die in § 9 Abs. 1 StrlSchV genannten Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt sind. Hierzu zählen:

1. Zuverlässigkeit des Antragsstellers, seiner zu Vertretung oder Geschäftsführung Berechtigten, sowie falls keine Strahlenschutzbeauftragten notwendig sind, erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz des Antragstellers
2. Zuverlässigkeit und Fachkunde der Strahlenschutzbeauftragten
3. Vorhandensein der für eine sichere Ausführung des Umgangs notwendige Anzahl von Strahlenschutzbeauftragten, denen die für die Erfüllung ihrer Aufgabe erforderlichen Befugnisse eingeräumt sind
4. Gewährleistung der notwendigen Kenntnisse der sonst bei dem Umgang tätigen Personen
5. Gewährleistung des Vorhandenseins der erforderlichen Ausrüstung und der Durchführung der erforderlichen Maßnahmen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zur Einhaltung der Schutzvorschriften
6. Vorhandensein des für eine sichere Ausführung des Umgangs notwendigen Personals
7. Einhaltung der erforderlichen Vorsorge zur Erfüllung gesetzlicher Schadensatzverpflichtungen
8. Gewährleistung des erforderlichen Schutzes gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
9. Kein Entgegenstehen überwiegender öffentlicher Interessen, insbesondere im Hinblick auf Umweltauswirkungen
10. § 4 Abs. 3 StrlSchV dem beabsichtigen Umgang nicht entgegensteht

Gemäß Ziffer 6.2 der Verordnung über die Zuständigkeit auf dem Gebiet des Arbeitsschutz-, Immissionsschutz-, Sprengstoff-, Gentechnik- und Strahlenschutzes sowie in andere Rechtsgebieten (ZustVo-Umwelt-Arbeitsschutz) vom 27.10.2009 (Nds. GVBl 2009, S. 374), geändert durch Art. 1 d. VO v. 14.11.2012 (Nds. GVBl. 2012, S. 444) sind die Gewerbeaufsichtsämter für die Erteilung von Umgangsgenehmigungen gemäß § 7 StrlSchV zuständig,

es sei denn die Genehmigung steht im Zusammenhang mit Kernanlagen, mit dem Umgang von Kernbrennstoffen außerhalb dieser Anlagen oder das Gewerbeaufsichtsamt ist in eigener Sache beteiligt. Dann ist die zuständige Landesbehörde die genehmigungserteilende Behörde.

In der Genehmigung zu dem Zwischenlager werden die Gesamtaktivitäten, die Ortsdosisleistungen und die für das Zwischenlager zugelassenen Behältertypen benannt. Diese Gesamtaktivitäten und Ortsdosisleistungen können höher oder niedriger sein als die Aktivitäten, die für den Transport der Gebinde oder auch für die Einlagerung in einem Endlager zulässig sind. Falls die Aktivitäten bzw. Ortsdosisleistungen im Zwischenlager höher sind als die zulässigen Werte, so sind diese Abfallgebinde solange zeitlich zwischenzulagern, bis sie die Anforderungen an den Transport bzw. an die Endlagerung erfüllen können (sogenannte Abklinglagerung). Sind die im Zwischenlager verwendeten Behältertypen für den Transport und/oder die Endlagerung nicht zulässig, so ist eine Verpackung der in diesen Behälter beinhalteten radioaktiven Abfälle oder eine Umverpackung dieser Behälter in zulässige Behältertypen notwendig.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen zum Transport

Die Beförderung von radioaktiven Stoffen unterliegt nationalen und internationalen Vorschriften. Die Grundlage für die sichere Beförderung ist die IAEA-Empfehlung TS-R-1 „Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material“ /IAEA 2009/. Die Umsetzung dieser IAEA-Empfehlung erfolgt international über die UN Recommendations, den sogenannten „Orange Books“, in die internationalen Gefahrgutbeförderungsvorschriften der einzelnen Verkehrsträger, z.B. RID /RID 2013/ für den Schienenverkehr und ADR /ADR 2013/ für den Straßenverkehr. Nationale Verordnungen setzen diese internationalen Vorschriften in Deutschland in Kraft, z.B. durch die Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt – GGV-SEB) /GGVSEB 2013/.

Das Ziel dieser Vorschriften ist die Gewährleistung des Schutzes von Personen, Eigentum und der Umwelt. Dieses Schutzziel wird im Wesentlichen durch das Konzept des „sicheren Versandstückes“ erreicht.

Als Versandstück wird die Verpackung mit radioaktivem Inhalt bezeichnet. Dies muss nicht unbedingt der gefüllte Endlagerbehälter sein. Je nach Behältertyp und Anforderung an diesen, können zum Versandstück noch Stoßdämpfer oder sonstige „Anbauten“ gehören.

Das Konzept des sicheren Versandstückes umfasst verschiedene Arten von Versandstücken:

- freigestellte Versandstücke
- Industrieverpackungen der Typen IP-1, IP-2 und IP-3
- Typ A-Versandstücke
- Typ B-Versandstücke

- Typ C-Versandstücke

Jedes dieser Versandstücktypen kann zusätzlich für spaltbare Stoffe genehmigt werden.

Für diese Versandstücktypen gibt es unterschiedliche Sicherheitsanforderungen. Diese sind abhängig von der Art und Menge des zu transportierenden radioaktiven Stoffes. Die Sicherheitsanforderungen reichen von allgemeinen Vorschriften an die Versandstücke mit sehr begrenztem Inhalt (freigestelltes Versandstück) bis hin zu unfallsicheren Versandstücken mit radioaktiven Stoffen hoher Aktivität (Typ B und C). Bei Versandstücken mit spaltbaren Stoffen ist zusätzlich die Kritikalitätssicherheit während des Transportes sicherzustellen.

Gemäß der ADR zählen zu den radioaktiven Stoffen beim Transport nur jene Stoffe, die die Aktivitätskonzentrationen und die Aktivität für freigestellte Sendungen gemäß Tabelle 2.2.7.2.2.1 der ADR unterschreiten. Diese Grenzwerte sind identisch mit den Freigrenzen in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). In der Tabelle 3-1 ist ein Ausschnitt aus der Tabelle 2.2.7.2.2.1 der ADR dargestellt.

Tabelle 3-1 Grundlegende Radionuklidwerte für einzelne Radionuklide gemäß der ADR/RID (Auszug)

Radionuklid	A ₁ [TBq]	A ₂ [TBq]	Aktivitätskonzentration für freigestellte Stoffe [Bq/g]	Aktivitätsgrenzwerte für freigestellte Sendung [Bq]
Ag-108m	7 E-01	7 E-01	7 E+01	1 E+06
Am-241	1 E+01	1 E-03	1 E+00	1 E+04
Ar-39	4 E+01	2 E+01	1 E+07	1 E+04
Ba-133	3 E+00	3 E+00	1 E+02	1 E+06
Be-10	4 E+01	6 E-01	1 E+04	1 E+06
C-14	4 E+01	3 E+00	1 E+04	1 E+07
Ca-41	Unbegrenzt	Unbegrenzt	1 E+05	1 E+07
Cd-109	3 E+01	2 E+00	1 E+04	1 E+06
Cd-113m	4 E+01	5 E-01	1 E+03	1 E+06
Cl-36	1 E+01	6 E-01	1 E+04	1 E+06
Cm-244	2 E+01	2 E-03	1 E+01	1 E+04
Co-60	4 E-01	4 E-01	1 E+01	1 E+05
Cs-134	7 E-01	7 E-01	1 E+01	1 E+04
Cs-137	2 E+00	6 E-01	1 E+01	1 E+04
Eu-152	1 E+00	1 E+00	1 E+01	1 E+06
Eu-154	9 E-01	6 E-01	1 E+01	1 E+06
Eu-155	2 E+01	3 E+00	1 E+02	1 E+07
Fe-55	4 E+01	4 E+01	1 E+04	1 E+06
H-3	4 E+01	4 E+01	1 E+06	1 E+09
Ho-166m	6 E-01	5 E-01	1 E+01	1 E+06
Kr-85	1 E+01	1 E+01	1 E+05	1 E+04
Mo-93	4 E+01	2 E+01	1 E+03	1 E+08
Na-22	5 E-01	5 E-01	1 E+01	1 E+06
Nb-93m	4 E+01	3 E+01	1 E+04	1 E+07

Radionuklid	A ₁ [TBq]	A ₂ [TBq]	Aktivitätskonzentration für freigestellte Stoffe [Bq/g]	Aktivitätsgrenzwerte für freigestellte Sendung [Bq]
Nb-94	7 E-01	7 E-01	1 E+01	1 E+06
Ni-59	Unbegrenzt	Unbegrenzt	1 E+04	1 E+08
Ni-63	4 E+01	3 E+01	1 E+05	1 E+08
Pm-147	4 E+01	2 E+00	1 E+04	1 E+07
Pu-238	1 E+01	1 E-03	1 E+00	1 E+04
Pu-239	1 E+01	1 E-03	1 E+00	1 E+04
Pu-240	1 E+01	1 E-03	1 E+00	1 E+04
Pu-241	4 E+01	6 E-02	1 E+02	1 E+05
Rb-87	Unbegrenzt	Unbegrenzt	1 E+04	1 E+07
Sb-125	2 E+00	1 E+00	1 E+02	1 E+06
Se-79	4 E+01	2 E+00	1 E+04	1 E+07
Sm-151	4 E+01	1 E+01	1 E+04	1 E+08
Sn-121m	4 E+01	9 E-01	1 E+03	1 E+07
Sr-90	3 E-01	3 E-01	1 E+02	1 E+04
Tc-99	4 E+01	9 E-01	1 E+04	1 E+07
Te-125m	2 E+01	9 E-01	1 E+03	1 E+07
Th-231	4 E+01	2 E-02	1 E+03	1 E+07
Th-234	3 E-01	3 E-01	1 E+03	1 E+05
Tl-204	1 E+01	7 E-01	1 E+04	1 E+04
U-232	4 E+01 ¹	1 E-02 ¹	1 E+00 ¹	1 E+03 ¹
	4 E+01 ²	7 E-03 ²	1 E+01 ²	1 E+04 ²
	1 E+01 ³	1 E-03 ³	1 E+02 ³	1 E+04 ³
U-233	4 E+01 ¹	9 E-02 ¹	1 E+01 ¹	1 E+04 ¹
	4 E+01 ²	2 E-03 ²	1 E+02 ²	1 E+05 ²
	4 E+01 ³	6 E-03 ³	1 E+01 ³	1 E+05 ³
U-235	Unbegrenzt	Unbegrenzt	1 E+01	1 E+04
U-238	Unbegrenzt	Unbegrenzt	1 E+01	1 E+04
Y-90	3 E-01	3 E-01	1 E+03	1 E+05
Zr-93	Unbegrenzt	Unbegrenzt	1 E+03	1 E+07

1: schnelle Absorption durch die Lunge; 2: mittlere Absorption durch die Lunge; 3: langsame Absorption durch die Lunge

Bei freigestellten Versandstücken muss das Versandstück die Aktivitätsgrenzwerte für freigestellte Versandstücke gemäß Tabelle 2.2.7.2.2.2.1 der ADR (Tabelle 3-1) unterschreiten und die Dosisleistung am Versandstück muss kleiner 5 µSv/h sein. Ein freigestelltes Versandstück hat ein sehr begrenztes radiologisches Gefährdungspotential und die Verpackungen, die für solch ein Versandstück zugelassen sind, müssen nur den Routinebeanspruchungen standhalten.

Werden die Aktivitätsgrenzwerte gemäß Tabelle 2.2.7.2.2.2.1 der ADR (Tabelle 3-1) und/oder eine Dosisleistung von 5 µSv/h am Versandstück überschritten, so muss ein anderer Versandstücktyp gewählt werden.

Industrieverpackungen sind nur für LSA-Stoffe (low specific activity) oder SCO-Stoffe (surface contaminated objects) zugelassen. Im Anhang werden die LSA-Stoffe und die SCO-Stoffe erläutert.

Typ A-Verpackungen sind zugelassen für radioaktive Stoffe die die Aktivitätsgrenzwerte A_1 (radioaktive Stoffe in besonderer Form, gekapselte Stoffe) bzw. A_2 in der Tabelle 2.2.7.2.2.1 (Tabelle 3-1) der ADR nicht überschreiten.

Die Industrieverpackungen und Typ A-Versandstücke haben ein mittleres Gefährdungspotential aufgrund ihrer Beschaffenheit (niedrige spezifische Aktivität bzw. geringe Verstreubarkeit) und ihrer Menge. Diese Verpackungen müssen zum Teil kleinere Zwischenfälle überstehen, aber keine Unfälle.

Für die Versandstücke Typ B und C gelten die Aktivitätsgrenzwerte gemäß ihrer Zulassung. Diese Versandstückstypen haben ein hohes radiologisches Gefährdungspotential. Es besteht ein Kritikalitätsrisiko, falls spaltbare Stoffe transportiert werden. Diese Verpackungen müssen unfallsicher sein und bedürfen einer behördlichen Zulassung.

Jedes Versandstück wird durch seine Bauart beschrieben. Zur Bauart zählen u.a.

- Beschreibung zum Inhalt und zur Verpackung
- Konstruktionszeichnungen
- Werkstoffspezifikationen

Der Nachweis, dass eine Bauart alle sicherheitstechnischen Anforderungen eines Versandstückes erfüllt, ist in einem Sicherheitsbericht zu führen. Es gibt dabei zulassungspflichtige und nicht zulassungspflichtige Bauarten. Bauarten für Versandstücke mit erhöhten sicherheitstechnischen Anforderungen, wie bei Typ-B und Typ-C Versandstücken sind zulassungspflichtig. Für die nicht zulassungspflichtigen Bauarten (freigestelltes Versandstück, Industrieverpackungen und Typ-A Versandstück) muss ein dokumentierter Nachweis vorliegen, der die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen des Gefahrgutrechts belegt.

Die allgemeinen Anforderungen an die Versandstücke sind wie folgt:

- Sicherer Einschluss des radioaktiven Inhaltes
- Abschirmung der Strahlung
- Abfuhr der Nachzerfallswärme
- Sicherstellen der Unterkritikalität
- Leichte und sichere Handhabbarkeit
- Leichte Dekontaminierbarkeit
- Sichere Verschlusseinrichtungen
- Verträglichkeit der Werkstoffe und des Inhalts
- Berücksichtigung anderer gefährlicher Eigenschaften des Inhalts
- Kleinste Abmessung mindestens 10 cm (ab IP-1)

Versandstücke des Typs IP-2 müssen zusätzlich zu den oben genannten allgemeinen Anforderungen noch folgende Prüfungen bestehen:

- Freifallprüfung, deren Fallhöhe abhängig von der Masse des Versandstücks ist
- Druckbelastungsprüfung über 24 Stunden

Zusätzlich zu den Prüfungen für das Versandstück Typ IP-2 müssen die Versandstücke vom Typ IP-3 und Typ-A die folgenden Prüfungen überstehen:

- Wassersprühprüfung (1 Stunde lang 5 cm Niederschlag)
- Durchstoßungsprüfung

Bei einem Typ-A Versandstück muss unter bestimmten Bedingungen noch eine Freifallprüfung mit einer Fallhöhe von 9 m überstanden werden.

Versandstücke vom Typ-B müssen die folgenden Prüfungen überstehen:

- Fallprüfung I: Fallhöhe 9 m, unnachgiebiges Fundament, ungünstige Aufprallorientierung oder
- Fallprüfung III: 9 m, 5.000 kg Fallmasse, 1x1 m Grundfläche bei Verpackungen < 500 kg und einer Gesamtdichte < 1.000 kg/m³
- Fallprüfung II: Fallhöhe 1 m, Dorndurchmesser 15 cm, Dornlänge 20 cm
- Erhitzungsprüfung: 30 Minuten bei 800 °C
- Wassertauchprüfung: 8 Stunden, 15 m Wassertiefe oder 1 Stunde, 200 m Wassertiefe für Versandstücke mit mehr als 10⁵ A₂

Versandstücke vom Typ-C müssen die folgenden Prüfungen überstehen:

- Erhitzungsprüfung: 60 Minuten bei 800 °C
- Aufprallprüfung: 90 m/s (ca. 400 m ohne Luftwiderstand)
- Eindring-/Zerreißprüfung: Fall aus 3 m auf zylindrische Stange, oder zylindrische Stange (250 kg) aus 3 m auf Versandstück (wenn < 250 kg)
- Wassertauchprüfung: 1 Stunde, 200 m Wassertiefe

Das zuständige Ministerium für die Beförderung gefährlicher Güter ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Das BMVI ist ermächtigt die Zuständigkeit für die Bauart-Zulassung von Versandstücken zu regeln. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ist entsprechend den Zuständigkeitsregelungen in den Gefahrgutverordnungen für diese Versandstücke und für die Anerkennung ausländischer Bauart-Zulassungen zuständig.

In der ADR/RID sind die Dosisleistungsgrenzwerte bzw. Kontaminationsgrenzwerte am Versandstück und am Fahrzeug geregelt. Demnach gelten für die Dosisleistung folgende Grenzwerte:

- Am Fahrzeug:
 - o 2 mSv/h an der Außenseite

- 0,1 mSv/h in 2 m Abstand
- Am Versandstück:
 - 5 µSv/h an der Oberfläche bei freigestellten Versandstücken
 - 2 mSv/h an der Oberfläche
 - 0,1 mSv/h in 1 m Abstand
 - 10 mSv/h an der Oberfläche unter ausschließlicher Verwendung
 - > 0,1 mSv/h in 1 m Abstand unter ausschließlicher Verwendung

Für die Kontamination gelten folgende Grenzwerte:

- Am Fahrzeug, an der Ausrüstung (abwischbar):
 - 4,0 Bq/cm² für β/γ-Strahler und α-Strahler niedriger Toxizität
 - 0,4 Bq/cm² für alle anderen α-Strahler
- Am Versandstück (Außenseite, abwischbar):
 - 4,0 Bq/cm² für β/γ-Strahler und α-Strahler niedriger Toxizität
 - 0,4 Bq/cm² für alle anderen α-Strahler

Darüber hinaus ist in der ADR/RID geregelt, wie das Versandstück und das Fahrzeug zu deklarieren sind und welche UN-Nummer bei der Beförderung zu verwenden ist.

3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen bei der Endlagerung

Gesetze zur Endlagerung existieren in Deutschland nicht in der Form wie es beim Gefahrgutrecht der Fall ist. Die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Endlagerung werden durch das Atomgesetz (AtG) /AtG 2013/, die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /StrlSchV 2012/, die vom Bundesministerium für Umwelt und Klimaschutz veröffentlichten Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Stoffe /BMU 2010/ und den Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers mit den dazugehörigen Genehmigungsunterlagen vorgegeben.

Im Atomgesetz ist geregelt, wie mit radioaktiven Reststoffen und Abfällen zu verfahren ist. Darüber hinaus ist geregelt, wer ein Endlager zu betreiben hat. In der Strahlenschutzverordnung ist neben den Freigrenzen für die Freigabe von radioaktiven Stoffen auch geregelt, wer die sicherheitstechnischen Anforderungen an Abfallgebinde sowie die Vorgaben zur Behandlung der darin enthaltenen Abfälle festlegt.

Gemäß AtG § 9a Absatz 1 sind radioaktive Reststoffe sowie ausgebaute oder abgebaute radioaktive Anlagenteile schadlos zu verwerten oder als radioaktive Abfälle geordnet zu beseitigen (direkte Endlagerung). Im Absatz 3 ist geregelt, dass der Bund Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zu errichten hat. Gemäß Absatz 2 müssen diejenigen, die radioaktive Abfälle besitzen, diese an eine Anlage nach Absatz 3 abliefern (Ablieferungspflicht der Abfallverursacher).

Das Bundesamt für Strahlenschutz ist gemäß § 23 AtG für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers zuständig. Für die Planfeststellung und Genehmigung nach § 9b AtG des Endlagers, sowie die Erteilung der bergrechtlichen Zulassungen, die Bergaufsicht und die

Erteilung von der wasserrechtlichen Erlaubnis des Endlagers ist gemäß § 23d das Bundesamt für kerntechnische Entsorgung zuständig.

Gemäß § 74 StrlSchV hat die nach dem AtG für die Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständige Behörde alle sicherheitstechnischen Anforderungen an Abfallgebinde sowie die Vorgaben für die Behandlung der darin enthaltenen Abfälle festzulegen. Des Weiteren stellt diese Behörde die Endlagerfähigkeit dieser Abfallgebinde fest.

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 2010/ legen fest, welches Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen nachweislich einzuhalten ist. Sie gelten ausschließlich für ein zu errichtendes Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. In den Sicherheitsanforderungen werden nicht die rechtlichen Verfahren zur Auswahl des Endlagerstandortes und zur Zulassung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle festgelegt.

In den Sicherheitsanforderungen ist nicht geregelt, welche Eigenschaften die endzulagernden radioaktiven Abfälle haben müssen, wie sie konditioniert werden sollen oder in welche Behälter sie verpackt werden müssen. Lediglich im Abschnitt 8.6 werden Anforderungen an die Abfallbehälter bei der Rückholung oder der Bergung aus dem Endlager formuliert.

Gemäß dem Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen müssen Abfallbehälter unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzen radioaktiver Aerosole zu beachten.
- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

Der Abschnitt 8.6 gilt nicht für Abfallbehälter mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen /BMU 2010/.

In den zum Planfeststellungsbeschluss zugehörigen Genehmigungsunterlagen sind die detaillierteren Anforderungen an die Endlagerbehälter und die endzulagernden Abfälle festgelegt. In diesen Unterlagen werden auch die Anforderungen aus § 74 StrlSchV erfüllt.

In Deutschland gibt es mit dem Endlager Konrad ein planfestgestelltes Endlager, das sich in der Errichtung befindet. Für das Endlager Konrad gibt es einen Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002 /NMU 2002/ mit den dazugehörigen Genehmigungsunterlagen. Für ein weiteres Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente gibt es derzeit keinen Planfeststellungsbeschluss. Es kann aber davon aus-

gegangen werden, dass für ein solches Endlager ähnliche Vorschriften und Regelungen gelten werden, wie für das planfestgestellte Endlager Konrad.

Im Folgenden werden die Unterlagen und Festlegungen aus dem Planfeststellungsbeschluss zum Endlager Konrad beschrieben.

Die für die radioaktiven Abfälle und die Endlagerbehälter wichtigsten Unterlagen sind die folgenden Genehmigungsunterlagen:

- EU 117 Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle – Schachtanlage Konrad – (Endlagerungsbedingungen) /BfS 1997a/
- EU 240 Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, 18.02.1997 /BfS 1997b/

Diese Unterlagen werden ständig fortgeschrieben und erweitert. Im Rahmen dieses Berichtes werden wir uns auf die aktuellen Fortschreibungen beziehen:

- Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle, Rev. 1, Oktober 2010 /BfS 2010a/
- Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, radiologische Aspekte, Rev. 1, Oktober 2010 /BfS 2010b/
- Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, stoffliche Aspekte, Rev. 1, Oktober 2010 /BfS 2010c/

Im Folgenden werden die Grundanforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle beschrieben.

Es dürfen nur radioaktive Abfälle an das Endlager Konrad abgeliefert werden, wenn sie konditioniert wurden und die Abfallgebinde so beschaffen sind, dass sie die aus den sicherheitsanalytischen Untersuchungen (z.B. bestimmungsgemäßer Betrieb und Störfallanalyse) abgeleiteten Anforderungen erfüllen können. Der Ablieferungspflichtige ist für die Einhaltung dieser Anforderungen verantwortlich.

Endzulagernde radioaktive Abfälle dürfen nicht mit folgenden Stoffen vermischt werden:

- Für die das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltfreundlichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW-/AbfG) gilt oder
- Die nach § 1 Abs. 3, Nr. 1 und 3 bis 8 KrW/AbfG nicht unter dieses Gesetz fallen.

Das KrW/AbfG /KrWAbfG 1994/ wurde aufgehoben und durch das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) /KrWG 2013/ ersetzt.

Die Einhaltung der Anforderungen an radioaktive Abfälle wird vor der Anlieferung von Abfallgebinden an das Endlager im Rahmen der Produktkontrolle (radiologisch und stofflich) geprüft. Und unabhängig von den Anforderungen aus den sicherheitsanalytischen Untersu-

chungen müssen die endzulagernden Abfallgebinde andere einschlägige Gesetze, Verordnungen und Richtlinien, wie z.B. das Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter, erfüllen.

Die Gebinde dürfen beim Einbringen des Pumpversatzes infolge des Auftriebs nicht aufschwimmen. Allerdings ist diese Anforderung nicht einfach umzusetzen und wird in der nächsten Revision der Endlagerungsbedingungen näher erläutert sein.

Die Ortsdosisleistung der Abfallgebinde, einschließlich des Anteils durch Neutronen, ist auf die folgenden Werte festgelegt:

- 2 mSv/h im Mittel an der Oberfläche (maximal lokal 10 mSv/h)
- 0,1 mSv/h in 1 m Abstand bei zylindrischen Behältern und in 2 m Abstand bei quaderförmigen Gebinden

Für die Flächenkontamination sind ebenfalls Grenzwerte festgelegt. Dabei ist über eine Fläche von 100 cm² zu mitteln, und die nicht festhaftende Flächenkontamination darf an keiner Stelle der Oberfläche des Abfallgebundes diese Werte überschreiten:

- 0,5 Bq/cm² für α -Strahler, für die eine Freigrenze von 5 E+03 Bq festgelegt ist
- 50 Bq/cm² für β/γ -Strahler für die eine Freigrenze von 5 E+06 Bq festgelegt ist, und
- 5 Bq/cm² für sonstige Radionuklide

Des Weiteren sind die Abfallgebinde weitgehend ohne Überdruck anzuliefern. Ihre Masse ist auf maximal 20 Mg begrenzt.

An die Abfallprodukte (konditionierte radioaktive Abfälle) werden auch unterschiedliche Anforderungen gestellt. Die Grundanforderungen für die Abfallprodukte stellen sich folgendermaßen dar:

- Feste Form
- Nicht faulen oder gären
- „keine“ flüssig- oder gasgefüllten Behältnisse (nicht vermeidbare Restgehalte sind erlaubt)
- „keine“ freien Flüssigkeiten oder Gase (nicht vermeidbare Restgehalte sind erlaubt)
- „keine“ selbstentzündlichen oder explosiven Stoffe enthalten
- Max. eine Massenkonzentration von 50 g pro 0,1 m³ Abfallprodukt für durch thermische Neutronen spaltbare Stoffe außer Natururan und abgereichertes Uran
- Brennbare radioaktive Abfälle, die spaltbare Stoffe außer Natururan und abgereicherten Uran mit einer Masse von mehr als 1 g pro Abfallgebinde enthalten, müssen in einer nicht brennbaren Abfallmatrix fixiert oder allseitig von einer inaktiven Schicht mit einem Wärmeleitwiderstand von mindestens 0,1 m²K/W umgeben oder in einem Abfallbehälter verpackt sein, der der Abfallbehälterklasse II zugeordnet wird
- Bei Abfallgebinden mit mehr als 15 g Spaltstoff ist der Nachweis zu erbringen, dass bei thermischer Belastung des Abfallgebundes eine lokale Aufkonzentrierung ausgeschlossen werden kann

Abfallprodukte, die unter Verwendung eines Fixierungsmittels hergestellt werden, müssen zusätzlich zu den Grundanforderungen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Reaktionen zwischen dem radioaktiven Abfall, dem Fixierungsmittel und der Verpackung müssen auf eine sicherheitstechnisch zulässigen Rate beschränkt sein
- Das verwendete Fixierungsmittel muss vollständig abgebunden haben oder muss vollständig erstarrt sein
- Das Vergießen von radioaktiven Abfällen oder Hohlräumen zwischen Innenbehältern hat mit geeigneten fließfähigen Fixierungsmitteln zu erfolgen, die ggf. durch technische Maßnahmen (z.B. Rütteln) zu verdichten sind
- Die für das Vergießen von radioaktiven Abfällen oder Hohlräumen zwischen Innenbehältern verwendeten Fixierungsmittel können auch mit kontaminierten Flüssigkeiten angemacht werden, wenn die Qualitätsmerkmale der betreffenden Abfallproduktgruppe eingehalten werden und die Verträglichkeit mit dem zu vergießenden Gut gewährleistet ist. In den kontaminierten Flüssigkeiten enthaltene Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen müssen bei der Aktivitätsangabe berücksichtigt werden.

Sofern radioaktive Abfälle in Verpackungen ohne spezifizierte Dichtheit Rn-220 freisetzen können, muss das Abfallprodukt von mindestens 40 mm inaktivem Beton vollständig umschlossen sein. Diese Betonumschließung kann entfallen, wenn die Aktivität der Radionuklide Th-232, Ra-228, Ac-228, Th-232 und Ra-224, die zu einer Freisetzung von Rn-220 führen können, jeweils $1,0 \text{ E}+06 \text{ Bq}$ pro Abfallgebinde bei unfixiertem Abfall und $5,0 \text{ E}+07 \text{ Bq}$ pro Abfallgebinde bei fixiertem Abfall unterschreiten.

Bei radioaktiven Abfällen, die Moderator- und/oder Reflektormaterialien enthaltend, ist eine Einzelfallprüfung durch das BfS erforderlich, wenn

- die Aktivität von U-233 den Wert von $1,8 \text{ E}+09 \text{ Bq/Abfallgebinde}$ (entsprechen der Masse von 5 g/Abfallgebinde) und
- die Aktivität von U-235, Pu-239 und Pu-241 1 % der zugehörigen Aktivitätswerte aus Tabelle 7a im Anhang II der Endlagerungsbedingungen

übersteigt und das betreffende Abfallgebinde

- mehr als 27,5 kg D_2O , 36 kg Beryllium oder 42 kg Graphit, vermischt mit spaltbaren Stoffen oder
- mehr als 275 kg D_2O , 360 kg Beryllium oder 420 kg Graphit, unvermischt mit spaltbaren Stoffen

enthält.

Die Abfallprodukte können gemäß den Endlagerungsbedingungen in 6 unterschiedliche Abfallproduktgruppen eingeordnet werden. Diese Gruppen unterscheiden sich in den Anforderungen, die aus sicherheitstechnischer Sicht an die Qualität des Abfallproduktes ge-

stellt werden. Die Abfallprodukte können derjenigen Abfallproduktgruppe zugeordnet werden, deren Qualitätsmerkmal sie erfüllen.

Bei der APG 01 müssen die Abfallprodukte lediglich die zuvor genannten Grundanforderungen erfüllen.

Soll das Abfallprodukt in die APG 02 eingeordnet werden, muss zusätzlich zu den Grundanforderungen hinaus gewährleistet sein, dass brennbare Abfallstoffe mit einem Schmelzpunkt kleiner als 300 °C so verarbeitet sind, dass sie nicht aus dem Abfallprodukt austreten, wenn sie bei thermischer Belastung flüssig werden oder sie weisen einen Anteil von nicht mehr als 1 % an Aktivität im betreffenden Abfallprodukt auf.

Bei einer Zuordnung zur APG03 darf der Abfall nur aus Metallteilen bestehen bzw. aus Werkstoffen von Einbauteilen eines Reaktorkerns mit der Ausnahme von Graphit.

Für die APG 04 muss der radioaktive Abfall mit einem Pressdruck von mindestens 30 MPa formstabil kompaktiert sein.

Bei der APG 05 muss der radioaktive Abfall in Zementstein oder Beton fixiert sein. Die Fixierung muss dabei so ausgeführt sein, dass

- bei eingebundenen oder verfestigten radioaktiven Abfällen (z.B. Aschen, Pulvern oder wässrigen Konzentrationen) die Aktivität gleichmäßig und vollständig im Zementstein oder Beton verteilt ist,
- bei vergossenen radioaktiven Abfällen (z.B. Schrott) die Aktivität – soweit technisch und aufgrund der Beschaffenheit des Abfalls sinnvoll machbar – möglichst gleichmäßig im Abfallprodukt verteilt ist und
- die Druckfestigkeit des Abfallproduktes mindestens 10 N/mm² beträgt.

Um ein Abfallprodukt in die APG 06 einzuordnen, muss das Abfallprodukt aus einem festen Körper mit einer Druckfestigkeit von mindestens 10 N/mm² bestehen und nicht brennbar sein.

Werden die Qualitätsmerkmale einer APG erfüllt, so kann das betreffende Abfallprodukt die zulässigen Aktivitätsgrenzwerte, die aus der Störfallanalyse resultieren (Tabellen 3 und 4 im Anhang II), ausschöpfen. Je höher die APG desto größer sind die zulässigen Aktivitäten. Bei störfallfest verpackten Abfällen der Abfallbehälterklasse I kann das Abfallprodukt generell die Aktivitätsgrenzwerte der APG 06 ausschöpfen. Wird als Verpackung die Abfallbehälterklasse II verwendet, so können für die Abfallprodukte die zulässigen Aktivitätsgrenzwerte der Abfallbehälterklasse II ausgeschöpft werden (Tabellen 3 und 4 Anhang II). Dies gilt auch für störfallfest verpackte Abfälle der Abfallbehälterklasse II.

Nicht nur an die Abfallgebinde und die Abfallprodukte werden Anforderungen gestellt, sondern auch an die Behälter.

Für das Endlager Konrad sind 11 Behältertypen zugelassen. 6 quaderförmige Containertypen, die aus Stahlblech, Beton oder Gusseisen gefertigt werden können, 2 zylindrische

Betonbehältertypen und 3 zylindrische Gussbehältertypen. Weitere Behältertypen können zugelassen werden, wenn sie die Abmessungen der anderen Behälter nicht überschreiten. Die Abmessungen der 11 zugelassenen Behältertypen sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2 Abmessungen der für das Endlager Konrad zugelassenen Behältertypen

Endlagerbehälter	Länge / Durchmesser [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gebinde- volumen [m³]
Betonbehälter Typ I	Ø 1.060	-	1.370	1,2
Betonbehälter Typ II	Ø 1.060	-	1.510	1,3
Gussbehälter Typ I	Ø 900	-	1.150	0,7
Gussbehälter Typ II	Ø 1.060	-	1.500	1,3
Gussbehälter Typ III	Ø 1.000	-	1.240	1,0
Container Typ I	1.600	1.700	1.450	3,9
Container Typ II	1.600	1.700	1.700	4,6
Container Typ III	3.000	1.700	1.700	8,7
Container Typ IV	3.000	1.700	1.450	7,4
Container Typ V	3.200	2.000	1.700	10,9
Container Typ VI	1.600	2.000	1.700	5,4

Grundsätzlich müssen die für das Endlager Konrad zulässigen Behälter den folgenden Anforderungen genügen:

- Die Auslegung muss so erfolgen, dass sie im befüllten Zustand über eine Höhe von mindestens 6 m ohne Beeinträchtigung ihrer Dichtheit und Integrität gestapelt werden können.
- Sofern die Abfallbehälter eine spezifizierte Dichtheit besitzen, diese durch ihre Auslegung selbst oder durch eine entsprechend dicht ausgelegte innere Verpackung des Abfallproduktes gewährleisten
- Sofern die Abfallbehälter aus Stahlblech hergestellt sind, innen und außen korrosionsgeschützt ausgeführt und mit einem entsprechenden Oberflächenschutz versehen sein
- Die Abfallbehälter müssen bei der Anlieferung frei von mechanischen und korrosiven Schäden sein, die ihre Dichtheit oder Integrität bei der Handhabung und Stapelung beeinträchtigen.
- Bei Verwendung von dekontaminierten Schrott oder abgereichertem Uran als Material für Abfallbehälter oder Innenauskleidungen müssen die hierin enthaltenen Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen bei der Aktivitätsangabe berücksichtigt werden.

Die Abfallbehälter können zwei Abfallbehälterklassen (ABK) zugeordnet werden. Beide Abfallbehälterklassen unterscheiden sich in ihren Anforderungen, die aus sicherheitstechnischer Sicht an die Qualität der Verpackung gestellt werden. Bei Erfüllung der Qualitätsmerkmale einer ABK können bei Verwendung der betreffenden Verpackung die für die jeweilige APG zulässigen Aktivitätsgrenzwerte ausgeschöpft werden.

Verpackungen, die der Abfallbehälterklasse I (ABK I) zugeordnet werden, müssen über die Grundanforderungen hinaus die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Die Abfallbehälter sind so ausgelegt, dass bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s ihre Integrität soweit erhalten bleibt, dass bei einer nachfolgenden thermischen Einwirkung (Schadensfeuer mit einer Temperatur von 800 °C während einer Stunde) der Sauerstoffzutritt an das Abfallprodukt so begrenzt ist, dass brennbare Abfallprodukte mit einem Schmelzpunkt über 300 °C nicht mit offener Flamme abbrennen, sondern pyrolysieren.

Verpackungen, die der ABK II zugeordnet sind, müssen über die Grundanforderungen hinaus gewährleisten, dass:

- sie einem Fall aus 5 m Höhe auf eine unnachgiebige Unterlage derart standhalten, dass die Gesamtleckrate (bezogen auf Standardbedingungen bei der Dichtheitsprüfung nach der Vakuum-Methode) nach dem Fall 1 E-04 Pa m³/s nicht überschreitet und
- bei einem Schadensfeuer mit einer Temperatur von 800 °C während einer Stunde sichergestellt ist, dass die Gesamtleckrate vor dem Brand kleiner 1 E-5 Pa m³/s ist und die Stoffmenge des aus der Verpackung freigesetzten Gases während des Brandes und einer Abkühlphase von 24 Stunden einen Wert von einem Mol nicht überschreitet.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, beide ABK störfallfest auszulegen. Bei störfallfesten verpackten Abfällen der ABK I muss über die Grundanforderungen hinaus, folgendes erfüllt werden:

- Der radioaktive Abfall entweder formstabil fixiert oder in Innenbehälter verpackt sein, die formstabil vergossen werden
- Das Abfallprodukt allseitig von einer inaktiven Schicht mit einem Wärmleitwiderstand von mindestens 0,1m²K/W umgeben ist, die bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s intakt bleibt und
- Die Verpackung sicherstellt, dass bei einem Fall aus 5 m Höhe auf eine unnachgiebige Unterlage die formstabile Fixierung des radioaktiven Abfalls oder die Integrität der Innenbehälter erhalten bleibt.

Bei störfallfesten verpackten Abfällen der ABK II muss über die Grundanforderungen hinaus gewährleistet sein, dass

- Die Verpackung einem Fall aus 5 m Höhe auf eine unnachgiebige Unterlage derart standhält, dass die Gesamtleckrate nach dem Fall 1 E-04 Pa m³/s nicht überschreitet oder
- Bei formstabil fixierten und in Innenbehältern verpackten radioaktiven Abfällen die Integrität der Innenbehälter nach einem Fall aus 5 m Höhe auf eine unnachgiebige Unterlage erhalten bleibt, und

- Die Wandung der Verpackung bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s einen Wärmeleitwiderstand von mindestens 0,1 m²K/W besitzt oder
- bei einem Schadensfeuer mit einer Temperatur von 800 °C während einer Stunde sichergestellt ist, dass eine radiologisch relevante Freisetzung radioaktiver Stoffe während des Brandes und einer Abkühlphase von 24 Stunden nicht erfolgt.

Für die Verpackung von Abfallprodukten ist es zulässig, Innenbehälter zu verwenden. Als Innenbehälter werden z.B. 200-l- und 400-l-Fässer sowie Metallkartuschen oder -trommeln verwendet. Die Innenbehälter müssen deklariert werden und müssen so befüllt werden, dass die Grenzwerte der Ortsdosisleistung eingehalten werden und eine Beschädigung des Behälters durch den Innenbehälter bzw. das Abfallprodukt ausgeschlossen ist. An die Innenbehälter an sich werden keine Anforderungen gestellt, sofern sie nicht zur Einhaltung von spezifizierten Dichtheiten der Verpackungen dienen.

In den Endlagerungsbedingungen Konrad sind die zulässigen Aktivitäten von Radionukliden und Radionuklidgruppen pro Abfallgebinde angegeben. Diese zulässigen Aktivitäten resultieren aus den Sicherheitsanalysen für die Betriebs- und Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad. Die auf diese Weise abgeleiteten Aktivitätsbegrenzungen können z.T. weit über den tatsächlich vorhandenen und zukünftigen Aktivitäten liegen. Die einzuhaltenden Aktivitäten für Radionuklide und Radionuklidgruppen pro Abfallgebinde sind in tabellarischer Form getrennt nach den Sicherheitsanalysen angegeben. Für folgende Sicherheitsanalysen sind Aktivitätsgrenzen angegeben:

- bestimmungsgemäßer Betrieb (Tabelle 2, Anhang II)
- unterstellte Störfälle (Tabellen 3 und 4, Anhang II)
- thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins (Tabellen 5 und 6, Anhang II)
- Kritikalitätssicherheit (Tabelle 7a und 7b, Anhang II)

In den Tabellen 3-3 bis 3-6 sind Auszüge aus den oben genannten Tabellen der Endlagerungsbedingungen dargestellt.

Tabelle 3-3 Garantiewerte für Radionuklide und Radionuklidgruppen pro Abfallgebinde, die aus der Sicherheitsanalyse für den bestimmungsgemäßen Betrieb resultieren

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Verpackungen ohne spezi- fizierte Dichtheit		Verpackung mit spezifizierter Dichtheit					
			Jährlicher Durchlässigkeitsfaktor					
			≤ 0,01		≤ 0,001		≤ 0,0001	
	Metallische Feststoffe [Bq/EB ¹]	Sonstige APG [Bq/EB ¹]	Metallische Feststoffe [Bq/EB ¹]	Sonstige APG [Bq/EB ¹]	Metallische Feststoffe [Bq/EB ¹]	Sonstige APG [Bq/EB ¹]	Metallische Feststoffe [Bq/EB ¹]	Sonstige APG [Bq/EB ¹]
Tritium - unspezifiziert - als HTO mit einer Gesamtaktivität im Abfallprodukt ohne Tritiumaktivität von: a) < 10 ¹⁰ Bq b) ≥ 10 ¹⁰ Bq und < 10 ¹² Bq c) ≥ 10 ¹² Bq - als HT	1,9 E+11	3,0 E+09 7,4 E+10 4,2 E+10 3,0 E+09	1,9 E+11	3,3 E+09 8,4 E+12 9,5 E+10 3,3 E+09	1,9 E+11	3,3 E+09 8,4 E+12 9,5 E+10 3,3 E+09	1,9 E+11	3,3 E+09 8,4 E+12 9,5 E+10 3,3 E+09
C-14 - unspezifiziert oder in flüchtiger Form - Anteil in flüchtiger Form: a) > 1 % und ≤ 10 % b) ≤ 1%	8,4 E+12	1,8 E+08 1,8 E+09 1,8 E+10	8,4 E+12	1,8 E+08 1,8 E+09 1,8 E+10	8,4 E+12	1,8 E+08 1,8 E+09 1,8 E+10	8,4 E+12	1,8 E+08 1,8 E+09 1,8 E+10

¹: Endlagerbehälter = Gebinde

Tabelle 3-4 Aktivitätsgrenzwerte für Leitnuklide, weitere Nuklide und nicht spezifizierte sonstige α - und β/γ -Strahler, die aus der Störfallanalyse resultieren

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Abfallbehälterklasse I						Abfallbehälterklasse II
	Abfallproduktgruppe (APG)						APG
	01 [Bq/EB ¹]	02 [Bq/EB ¹]	03 [Bq/EB ¹]	04 [Bq/EB ¹]	05 [Bq/EB ¹]	06 [Bq/EB ¹]	01 – 06 [Bq/EB ¹]
Leitnuklide							
Cl-36	4,3 E+08	4,3 E+08	4,3 E+08	4,3 E+08	4,3 E+08	4,3 E+08	1,1 E+10
Se-79	7,0 E+08	2,4 E+10	8,7 E+10	2,1 E+11	7,0 E+11	7,0 E+11	1,7 E+13
Cd-113m	7,3 E+08	2,6 E+10	9,1 E+10	2,1 E+11	7,3 E+11	7,3 E+11	1,9 E+13
Sr-90	8,6 E+08	3,0 E+10	1,1 E+11	2,7 E+11	8,6 E+11	8,6 E+11	2,1 E+13
Ag-108m	9,6 E+08	3,4 E+10	1,2 E+11	3,0 E+11	9,6 E+11	9,6 E+11	2,6 E+13
Nb-94	1,1 E+09	3,9 E+10	1,4 E+11	3,6 E+11	1,1 E+12	1,1 E+12	2,7 E+13
Na-22	2,3 E+09	8,0 E+10	2,9 E+11	7,3 E+11	2,3 E+12	2,3 E+12	5,7 E+13
Rb-87	3,4 E+09	1,2 E+11	4,1 E+11	1,1 E+12	3,4 E+12	3,4 E+12	8,4 E+13
Eu-152	4,4 E+09	1,6 E+11	5,4 E+11	1,4 E+12	4,4 E+12	4,4 E+12	1,1 E+14
Co-60	5,0 E+09	1,7 E+11	6,1 E+11	1,6 E+12	5,0 E+12	5,0 E+12	1,2 E+14
Cs-137	5,1 E+09	1,9 E+11	6,4 E+11	1,7 E+12	5,1 E+12	5,1 E+12	1,3 E+14
U-232	3,1 E+08	1,6 E+10	4,0 E+10	9,9 E+10	3,1 E+11	3,1 E+11	7,9 E+12
Am-241	7,6 E+08	3,7 E+10	9,3 E+10	2,3 E+11	7,6 E+11	7,6 E+11	1,9 E+13
Pu-239	8,3 E+08	4,1 E+10	1,0 E+11	2,6 E+11	8,3 E+11	8,3 E+11	2,1 E+13
Weitere Nuklide							
Ar-39	2,9 E+16	2,9 E+16	2,9 E+16	2,9 E+16	2,9 E+16	2,9 E+16	7,1 E+17
Ba-133	1,4 E+10	4,9 E+11	1,7 E+12	4,3 E+12	1,4 E+13	1,4 E+13	3,4 E+14
Be-10	8,6 E+11	4,3 E+13	1,1 E+14	2,7 E+14	8,6 E+14	8,6 E+14	2,1 E+16
H-3	2,1 E+14	2,1 E+14	2,1 E+14	2,1 E+14	4,4 E+14	2,1 E+14	5,4 E+16
C-14	1,0 E+12	1,0 E+12	1,0 E+12	1,0 E+12	2,1 E+15	2,1 E+15	1,7 E+14
Ca-41	1,6 E+10	5,4 E+11	2,0 E+12	5,0 E+12	1,6 E+13	1,6 E+13	4,0 E+14
Cd-109	9,3 E+10	3,6 E+12	1,2 E+13	2,9 E+13	9,3 E+13	9,3 E+13	2,3 E+15
Cm-244	1,4 E+09	6,9 E+10	1,7 E+11	4,3 E+11	1,4 E+12	1,4 E+12	3,4 E+13
Cs-134	1,9 E+10	6,6 E+11	2,3 E+12	5,7 E+12	1,9 E+13	1,9 E+13	4,6 E+14

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Abfallbehälterklasse I						Abfallbehälterklasse II
	Abfallproduktgruppe (APG)						APG
	01 [Bq/EB ¹]	02 [Bq/EB ¹]	03 [Bq/EB ¹]	04 [Bq/EB ¹]	05 [Bq/EB ¹]	06 [Bq/EB ¹]	01 – 06 [Bq/EB ¹]
Eu-154	6,3 E+09	2,1 E+11	7,9 E+11	2,0 E+12	6,3 E+12	6,3 E+12	1,6 E+14
Eu-155	2,1 E+11	7,1 E+12	2,6 E+13	6,4 E+13	2,1 E+14	2,1 E+14	5,0 E+15
Fe-55	1,4 E+13	4,9 E+14	1,7 E+15	4,3 E+15	1,4 E+16	1,4 E+16	3,4 E+17
Kr-85	2,1 E+16	2,1 E+16	2,1 E+16	2,1 E+16	2,1 E+16	2,1 E+16	5,6 E+17
Mo-93	7,6 E+10	2,6 E+12	9,4 E+12	2,3 E+13	7,6 E+13	7,6 E+13	1,9 E+15
Nb-93m	4,7 E+11	1,7 E+13	5,9 E+13	1,4 E+14	4,7 E+14	4,7 E+14	1,2 E+16
Ni-59	7,6 E+11	2,7 E+13	9,3 E+13	2,3 E+14	7,6 E+14	7,6 E+14	1,9 E+16
Ni-63	7,0 E+11	2,4 E+13	8,7 E+13	2,1 E+14	7,0 E+14	7,0 E+14	1,7 E+16
Pm-147	6,4 E+12	2,7 E+14	8,0 E+14	2,1 E+15	6,4 E+15	6,4 E+15	1,6 E+17
Pu-241	1,7 E+10	8,6 E+11	2,1 E+12	5,3 E+12	1,7 E+13	1,7 E+13	4,3 E+14
Pu-238	8,9 E+08	4,4 E+10	1,1 E+11	2,7 E+11	8,9 E+11	8,9 E+11	2,1 E+13
Pu-240	8,3 E+08	4,1 E+10	1,0 E+11	2,6 E+11	8,3 E+11	8,3 E+11	2,1 E+13
Pu-241	1,7 E+10	8,6 E+11	2,1 E+12	5,3 E+12	1,7 E+13	1,7 E+13	4,3 E+14
Sb-125	3,6 E+10	1,2 E+12	4,6 E+12	1,1 E+13	3,6 E+13	3,6 E+13	9,1 E+14
Sm-151	1,2 E+13	4,3 E+14	1,4 E+15	3,7 E+15	1,2 E+16	1,2 E+16	3,0 E+17
Tc-99	5,4 E+10	2,0 E+12	6,9 E+12	1,7 E+13	5,4 E+13	5,4 E+13	1,3 E+15
Te-125m	2,6 E+11	9,3 E+12	3,3 E+13	8,0 E+13	2,6 E+14	2,6 E+14	6,4 E+15
Th-234	2,1 E+12	7,6 E+13	2,6 E+14	6,6 E+14	2,1 E+15	2,1 E+15	5,1 E+16
U-233	2,1 E+09	1,1 E+11	2,7 E+11	6,9 E+11	2,1 E+12	2,1 E+12	5,4 E+13
U-235	2,4 E+09	1,3 E+11	3,1 E+11	7,9 E+11	2,4 E+12	2,4 E+12	6,3 E+13
U-238	2,4 E+09	1,3 E+11	3,1 E+11	7,9 E+11	2,4 E+12	2,4 E+12	6,3 E+13
Zr-93	2,4 E+11	8,9 E+12	3,1 E+13	7,9 E+13	2,4 E+14	2,4 E+14	6,3 E+15
Sonstige α-Strahler	8,3 E+08	4,1 E+10	1,0 E+11	2,6 E+11	8,3 E+11	8,3 E+11	2,1 E+13
Sonstige β/γ-Strahler	5,1 E+09	1,9 E+11	6,4 E+11	1,7 E+12	5,1 E+12	5,1 E+12	1,3 E+14

¹: Endlagerbehälter = Gebinde

Tabelle 3-5 **Aktivitätsgrenzwerte für Leitnuklide, weitere Nuklide und nicht spezifizierte sonstige α - und β/γ -Strahler, die aus der Analyse zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins resultieren**

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Betonbehälter		Gussbehälter		
	Typ I [Bq/EB ¹]	Typ II [Bq/EB ¹]	Typ I [Bq/EB ¹]	Typ II [Bq/EB ¹]	Typ III [Bq/EB ¹]
Leitnuklide					
U-235	7,4 E+09	8,1 E+09	4,7 E+09	8,1 E+09	6,3 E+09
U-233	9,0 E+09	9,8 E+09	5,7 E+09	9,8 E+09	7,7 E+09
U-238	2,7 E+10	2,9 E+10	1,7 E+10	2,9 E+10	2,3 E+10
Pu-238	4,5 E+11	4,9 E+11	2,8 E+11	4,9 E+11	3,8 E+11
Nb-94	2,5 E+11	2,8 E+11	1,6 E+11	2,8 E+11	2,2 E+11
Ca-41	8,5 E+11	9,2 E+11	5,4 E+11	9,2 E+11	7,2 E+11
Ag-108m	1,3 E+12	1,4 E+12	8,3 E+11	1,4 E+12	1,1 E+12
Cl-36	1,3 E+12	1,4 E+12	8,3 E+11	1,4 E+12	1,1 E+12
Be-10	1,3 E+12	1,4 E+12	8,3 E+11	1,4 E+14	1,1 E+12
Rb-87	1,9 E+12	2,1 E+12	1,2 E+12	2,1 E+12	1,6 E+12
Co-60	2,6 E+12	2,9 E+12	1,7 E+12	2,9 E+12	2,3 E+12
Ar-39	2,7 E+12	2,9 E+12	1,7 E+12	2,9 E+12	2,3 E+12
Cs-137	4,5 E+12	4,9 E+12	2,8 E+12	4,9 E+12	3,8 E+12
Ni-63	3,8 E+13	4,1 E+13	2,4 E+13	4,1 E+13	3,2 E+13
Fe-55	1,5 E+15	1,6 E+15	9,4 E+14	1,6 E+15	1,3 E+15
Weitere Nuklide					
Am-241	2,2 E+11	2,4 E+11	1,4 E+11	2,4 E+11	1,9 E+11
Ba-133	1,0 E+13	1,1 E+13	6,6 E+12	1,1 E+13	8,9 E+12
C-14	1,1 E+13	1,2 E+13	7,2 E+12	1,2 E+13	9,7 E+12
Cd-109	1,0 E+14	1,1 E+14	6,6 E+13	1,1 E+14	8,8 E+13
Cd-113m	1,7 E+13	1,9 E+13	1,1 E+13	1,9 E+13	1,5 E+13
Cm-244	8,0 E+11	8,7 E+11	5,0 E+11	8,7 E+11	6,8 E+11
Cs-134	5,5 E+12	6,0 E+12	3,5 E+12	6,0 E+12	4,7 E+12
H-3	9,1 E+14	9,9 E+14	5,8 E+14	9,9 E+14	7,8 E+14
Eu-152	3,9 E+12	4,3 E+12	2,5 E+12	4,3 E+12	3,4 E+12

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Betonbehälter		Gussbehälter		
	Typ I [Bq/EB ¹]	Typ II [Bq/EB ¹]	Typ I [Bq/EB ¹]	Typ II [Bq/EB ¹]	Typ III [Bq/EB ¹]
Eu-154	3,9 E+12	4,2 E+12	2,5 E+12	4,2 E+12	3,3 E+12
Eu-155	5,7 E+13	6,2 E+13	3,6 E+13	6,2 E+13	4,9 E+13
Kr-85	2,2 E+13	2,3 E+13	1,4 E+13	2,3 E+13	1,8 E+13
Mo-93	4,0 E+13	4,4 E+13	2,5 E+13	4,4 E+13	3,4 E+13
Na-22	3,6 E+12	4,0 E+12	2,3 E+12	4,0 E+12	3,1 E+12
Nb-93m	1,7 E+14	1,8 E+14	1,1 E+14	1,8 E+14	1,4 E+14
Ni-59	4,9 E+13	5,4 E+13	3,1 E+13	5,4 E+13	4,2 E+13
Pa-234m	1,4 E+14	1,6 E+14	9,1 E+13	1,6 E+14	1,2 E+14
Pu-239	8,1 E+10	8,8 E+10	5,1 E+10	8,8 E+10	6,9 E+10
Pu-240	1,0 E+11	1,1 E+11	6,5 E+10	1,1 E+11	8,8 E+10
Pu-241	6,7 E+12	7,3 E+12	4,3 E+12	7,3 E+12	5,7 E+12
Sb-125	1,3 E+13	1,4 E+13	8,0 E+12	1,4 E+13	1,1 E+13
Se-79	8,8 E+12	9,6 E+12	5,6 E+12	9,6 E+12	7,5 E+12
Sm-151	1,3 E+14	1,4 E+14	8,2 E+13	1,4 E+14	1,1 E+14
Sr-90	3,4 E+12	3,7 E+12	2,1 E+12	3,7 E+12	2,9 E+12
Tc-99	3,9 E+12	4,3 E+12	2,5 E+12	4,3 E+12	3,3 E+12
Te-125m	1,9 E+14	2,0 E+14	1,2 E+14	2,0 E+14	1,6 E+14
Th-234	2,8 E+13	3,1 E+13	1,8 E+13	3,1 E+13	2,4 E+13
U-232	6,5 E+10	7,1 E+10	4,1 E+10	7,1 E+10	5,5 E+10
Zr-93	5,4 E+12	5,9 E+12	3,4 E+12	5,9 E+12	4,6 E+12
Sonstige α-Strahler	6,2 E+10	6,8 E+10	4,0 E+10	6,8 E+10	5,3 E+10
Sonstige β/γ-Strahler	3,4 E+12	3,7 E+12	2,1 E+12	3,7 E+12	2,9 E+12

¹: Endlagerbehälter = Gebinde

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Container					
	Typ I [Bq/EB ¹]	Typ II [Bq/EB ¹]	Typ III [Bq/EB ¹]	Typ IV [Bq/EB ¹]	Typ V [Bq/EB ¹]	Typ VI [Bq/EB ¹]
Leitnuklide						
U-235	2,2 E+10	2,4 E+10	5,3 E+10	4,4 E+10	6,2 E+10	3,1 E+10
U-233	2,7 E+10	2,9 E+10	6,4 E+10	5,3 E+10	7,5 E+10	3,7 E+10
U-238	7,8 E+10	8,6 E+10	1,9 E+11	1,6 E+11	2,2 E+11	1,1 E+11
Pu-238	1,3 E+12	1,5 E+12	3,2 E+12	2,7 E+12	3,7 E+12	1,9 E+12
Nb-94	7,5 E+11	8,2 E+11	1,8 E+12	1,5 E+12	2,1 E+12	1,1 E+12
Ca-41	2,5 E+12	2,7 E+12	6,0 E+12	5,0 E+12	7,0 E+12	3,5 E+12
Ag-108m	3,9 E+12	4,2 E+12	9,3 E+12	7,8 E+12	1,1 E+13	5,4 E+12
Cl-36	3,9 E+12	4,2 E+12	9,3 E+12	7,8 E+12	1,1 E+13	5,4 E+12
Be-10	3,9 E+12	4,3 E+12	9,3 E+12	7,8 E+12	1,1 E+13	5,5 E+12
Rb-87	5,6 E+12	6,1 E+12	1,3 E+13	1,1 E+13	1,6 E+13	7,8 E+12
Co-60	7,8 E+12	8,5 E+12	1,9 E+13	1,6 E+13	2,2 E+13	1,1 E+13
Ar-39	8,0 E+12	8,7 E+12	1,9 E+13	1,6 E+13	2,2 E+13	1,1 E+13
Cs-137	1,3 E+13	1,4 E+13	3,2 E+13	2,6 E+13	3,7 E+13	1,8 E+13
Ni-63	1,1 E+14	1,2 E+14	2,7 E+14	2,2 E+14	3,1 E+14	1,6 E+14
Fe-55	4,4 E+15	4,8 E+15	1,1 E+16	8,8 E+15	1,2 E+16	6,2 E+15
Weitere Nuklide						
Am-241	6,6 E+11	7,3 E+11	1,6 E+12	1,3 E+12	1,9 E+12	9,3 E+11
Ba-133	3,1 E+13	3,4 E+13	7,4 E+13	6,2 E+13	8,7 E+13	4,3 E+13
C-14	3,4 E+13	3,7 E+13	8,1 E+13	6,7 E+13	9,4 E+13	4,7 E+13
Cd-109	3,1 E+14	3,4 E+14	7,4 E+14	6,1 E+14	8,6 E+14	4,3 E+14
Cd-113m	5,1 E+13	5,6 E+13	1,2 E+14	1,0 E+14	1,4 E+14	7,2 E+13
Cm-244	2,4 E+12	2,6 E+12	5,7 E+12	4,7 E+12	6,6 E+12	3,3 E+12
Cs-134	1,6 E+13	1,8 E+13	3,9 E+13	3,2 E+13	4,5 E+13	2,3 E+13
H-3	2,7 E+15	3,0 E+15	6,5 E+15	5,4 E+15	7,6 E+15	3,8 E+15
Eu-152	1,2 E+13	1,3 E+13	2,8 E+13	2,3 E+13	3,3 E+13	1,6 E+13
Eu-154	1,1 E+13	1,3 E+13	2,8 E+13	2,3 E+13	3,2 E+13	1,6 E+13
Eu-155	1,7 E+14	1,8 E+14	4,0 E+14	3,4 E+14	4,7 E+14	2,4 E+14

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Container					
	Typ I [Bq/EB ¹]	Typ II [Bq/EB ¹]	Typ III [Bq/EB ¹]	Typ IV [Bq/EB ¹]	Typ V [Bq/EB ¹]	Typ VI [Bq/EB ¹]
Kr-85	6,4 E+13	7,0 E+13	1,5 E+14	1,3 E+14	1,8 E+14	8,9 E+13
Mo-93	1,2 E+14	1,3 E+14	2,9 E+14	2,4 E+14	3,3 E+14	1,7 E+14
Na-22	1,1 E+13	1,2 E+13	2,6 E+13	2,2 E+13	3,0 E+13	1,5 E+13
Nb-93m	5,0 E+14	5,4 E+14	1,2 E+15	1,0 E+15	1,4 E+15	7,0 E+14
Ni-59	1,5 E+14	1,6 E+14	3,5 E+14	2,9 E+14	4,1 E+14	2,0 E+14
Pa-234m	4,2 E+14	4,6 E+14	1,0 E+15	8,5 E+14	1,2 E+15	5,9 E+14
Pu-239	2,4 E+11	2,6 E+11	5,7 E+11	4,8 E+11	6,7 E+11	3,4 E+11
Pu-240	3,1 E+11	3,3 E+11	7,3 E+11	6,1 E+11	8,5 E+11	4,3 E+11
Pu-241	2,0 E+13	2,2 E+13	4,8 E+13	4,0 E+13	5,6 E+13	2,8 E+13
Sb-125	3,8 E+13	4,1 E+13	9,0 E+13	7,5 E+13	1,1 E+14	5,3 E+13
Se-79	2,6 E+13	2,9 E+13	6,3 E+13	5,2 E+13	7,3 E+13	3,7 E+13
Sm-151	3,8 E+14	4,2 E+14	9,2 E+14	7,7 E+14	1,1 E+15	5,4 E+15
Sr-90	1,0 E+13	1,1 E+13	2,4 E+13	2,0 E+13	2,8 E+13	1,4 E+13
Tc-99	1,2 E+13	1,3 E+13	2,8 E+13	2,3 E+13	3,2 E+13	1,6 E+13
Te-125m	5,5 E+14	6,0 E+14	1,3 E+15	1,1 E+15	1,5 E+15	7,7 E+14
Th-234	8,3 E+13	9,1 E+13	2,0 E+14	1,7 E+14	2,3 E+14	1,2 E+14
U-232	1,9 E+11	2,1 E+11	4,6 E+11	3,9 E+11	5,4 E+11	2,7 E+11
Zr-93	1,6 E+13	1,7 E+13	3,8 E+13	3,2 E+13	4,5 E+13	2,2 E+13
Sonstige α-Strahler	1,8 E+11	2,0 E+11	4,4 E+11	3,7 E+11	5,2 E+11	2,6 E+11
Sonstige β/γ-Strahler	1,0 E+13	1,1 E+13	2,4 E+13	2,0 E+13	2,8 E+13	1,4 E+13

¹: Endlagerbehälter = Gebinde

Tabelle 3-6 **Aktivitätswerte bzw. Massen spaltbarer Stoffe außer Natururan und abgereichertem Uran, die aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit resultieren**

Behälter		U-233		U-235		Pu-239	Pu-241
		Anreicherungsgrad					
		≤ 5 % [Bq]/EB ¹ / [g]/EB ¹	> 5 % [Bq]/EB ¹ / [g]/EB ¹	≤ 5 % [Bq]/EB ¹ / [g]/EB ¹	> 5 % [Bq]/EB ¹ / [g]/EB ¹		
Betonbehälter	Typ I	4,5 E+10 / 125	1,3 E+10 / 38	1,6 E+07 / 210	5,5 E+06 / 69	8,7 E+10 / 38	7,2 E+13 / 19
	Typ II	4,5 E+10 / 125	1,3 E+10 / 38	1,6 E+07 / 210	5,5 E+06 / 69	8,7 E+10 / 38	7,2 E+13 / 19
Gussbehälter	Typ I	2,5 E+10 / 70	1,0 E+10 / 28	9,6 E+06 / 120	4,0 E+06 / 50	6,4 E+10 / 28	5,3 E+13 / 14
	Typ II	4,5 E+10 / 125	1,3 E+10 / 38	1,6 E+07 / 210	5,5 E+06 / 69	8,7 E+10 / 38	7,2 E+13 / 19
	Typ III	4,5 E+10 / 125	1,2 E+10 / 35	1,6 E+07 / 210	5,3 E+06 / 65	8,0 E+10 / 35	6,4 E+13 / 17
Container	Typ I	9,0 E+10 / 250	3,2 E+10 / 90	3,4 E+07 / 425	1,3 E+07 / 170	2,0 E+11/ 90	1,7 E+14 / 45
	Typ II	9,0 E+10 / 250	3,6 E+10 / 100	3,4 E+07 / 425	1,4 E+07 / 175	2,3 E+11 / 100	1,9 E+14 / 50
	Typ III	1,8 E+11 / 500	7,9 E+10 / 220	6,8 E+07 / 850	2,8 E+07 / 350	5,0 E+11 / 220	4,1 E+14 / 110
	Typ IV	1,8 E+11 / 500	6,4 E+10 / 180	6,8 E+07 / 850	2,6 E+07 / 330	4,1 E+11 / 180	3,4 E+14 / 90
	Typ V	1,8 E+11 / 500	7,9 E+10 / 220	6,8 E+07 / 850	2,8 E+07 / 350	5,0 E+11 / 220	4,1 E+14 / 110
	Typ VI	9,0 E+10 / 250	3,9 E+10 / 110	3,4 E+07 / 425	1,4 E+07 / 175	2,5 E+11 / 110	2,1 E+14 / 55

¹: Endlagerbehälter = Gebinde

Die zulässigen Aktivitäten bzw. Massen der höheren spaltbaren Aktiniden sind im Anhang III.4 der Endlagerungsbedingungen Konrad enthalten. Sie sind in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7 **Zulässige Aktivitäten bzw. Massen von höheren spaltbaren Aktiniden, die sich aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit ergeben. Angabe in Bq bzw. g pro Abfallgebinde**

Nuklid	Aktivität [Bq/EB ¹]	Masse [g/EB ¹]
Np-237	1,0 E+10	400
Am-241	4,0 E+13	320
Am-242m	9,3 E+10	0,26
Am-243	3,6 E+12	500
Cm-243	3,4 E+12	1,8
Cm-244	1,7 E+14	60
Cm-245	3,8 E+09	0,6
Cm-247	6,1 E+07	18
Cf-249	3,0 E+10	0,2
Cf-251	5,8 E+09	0,1

¹: Endlagerbehälter = Gebinde

Die aus den o.g. Sicherheitsanalysen abgeleiteten Anforderungen bestehen unabhängig voneinander. Die jeweils restriktivste Anforderung bezüglich der zulässigen Aktivitäten der Radionuklide und Radionuklidgruppen in einem Abfallgebinde muss eingehalten werden.

In der Tabelle 8 (Tabelle 3-8) des Anhangs II der Endlagerungsbedingungen Konrad sind die maximal einlagerbaren Aktivitäten relevanter Radionuklide und Radionuklidgruppen am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad angegeben. Aus diesen Aktivitätswerten und dem maximal einlagerbaren Abfallgebindevolumen von 303.000 m³ resultieren mittlere Aktivitätskonzentrationen, die in Tabelle 9 (Tabelle 3-9) im Anhang II der Endlagerungsbedingungen Konrad aufgeführt sind. Diese Konzentrationen können mit Zustimmung des BfS überschritten werden. Die Werte aus den Tabellen 8 und 9 im Anhang II sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 3-8 **Maximal einlagerbare Aktivitäten relevanter Radionuklide und Radionuklidgruppen am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad**

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Aktivität [Bq]
H-3	6,0 E+17
C-14	4,0 E+14
I-129	7,0 E+11
Ra-226	4,0 E+12
Th-232	5,0 E+11
U-235	2,0 E+11
U-236	1,0 E+12
U-238	1,9 E+12
P-239	2,0 E+15
Pu-241	2,0 E+17
Gesamt α-Strahler	1,5 E+17
Gesamt β/γ-Strahler	5,0 E+18

Tabelle 3-9 **Mittlere Aktivitätskonzentration relevanter Radionuklide und Radionuklidgruppen am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad**

Radionuklid / Radionuklidgruppe	Aktivitätskonzentration [Bq/m³]
H-3	1,9 E+12
C-14	1,3 E+09
I-129	2,3 E+06
Ra-226	1,3 E+07
Th-232	1,6 E+06
U-235	6,6 E+05
U-236	3,3 E+06
U-238	6,2 E+06
P-239	6,6 E+09
Pu-241	6,6 E+11
Gesamt α-Strahler	4,9 E+11
Gesamt β/γ-Strahler	1,6 E+13

In der Tabelle 10 im Anhang II der Endlagerungsbedingungen sind weitere Radionuklide, die in den radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten sind, angegeben. Ihre zulässigen Aktivitäten sind in den Anhängen III.2 der Endlagerungsbedingungen Konrad angegeben. Demnach müssen diese Radionuklide jeweils das 10^{-4} -fache der nicht spezifizierten sonstigen β-/γ-Strahler in der Tabelle 3-4 unterschreiten.

Neben den Aktivitätsgrenzwerten ist in den Endlagerungsbedingungen Konrad festgeschrieben, wie die Radionuklide und Radionuklidgruppen zu deklarieren sind.

Die Radionuklide und Radionuklidgruppen, die in der Tabelle 2 im Anhang II (Tabelle 3-3) der Endlagerungsbedingungen angegeben sind, müssen deklariert werden, wenn die Aktivi-

tät 1 % der in der Tabelle 2 genannten Werte überschreiten. Ausgenommen von dieser Regelung sind die Radionuklide H-3, C-14, I-129 und Ra-226. Diese müssen unabhängig von dieser 1 %-Grenze generell deklariert werden.

Auch die Radionuklide und Radionuklidgruppen, die in den Störfallanalysen bzw. in den sicherheitsanalytischen Untersuchungen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins als relevant identifiziert wurden, müssen deklariert werden, wenn ihre Aktivität 1 % der in Tabelle 3-4 bzw. Tabelle 3-6 genannten Werte überschreiten.

Von den Radionukliden die sich in den Analysen zur Kritikalitätssicherheit als relevant erwiesen haben, muss U-233 deklariert werden, wenn die Aktivität von 1,8 E+09 Bq/Abfallgebinde (entsprechen 5g/Abfallgebinde) überschritten wird. Die Aktivitäten der Radionuklide U-235, Pu-239 und Pu-241 sind unabhängig von einem Deklarationsschwellenwert anzugeben.

Die Deklaration von Aktivitäten der Radionuklide und Radionuklidgruppen, die gemäß Tabelle 8 im Anhang II (Tabelle 3-8) der Endlagerungsbedingungen Konrad am Ende der Betriebsphase des Endlagers begrenzt sind, ist unabhängig davon zu erfolgen, ob einer der vorstehende Deklarationswerte erreicht wird oder nicht.

Die eingelagerte Aktivität wird vom BfS für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers Konrad sowie für jedes laufende Betriebsjahr bilanziert. Um Scheinaktivitäten zu vermeiden, sollte die Angabe der Aktivitäten von Radionukliden und Radionuklidgruppen – soweit bekannt – auch unterhalb der betreffenden Deklarationsgrenzen erfolgen.

Die endzulagernden radioaktiven Abfälle bestehen zum weitaus überwiegenden Anteil aus einer Vielzahl von anorganischen und organischen nichtradioaktiven Stoffen. Hierzu zählen auch schädliche Stoffe, die nachteilige Veränderungen des Grundwassers bewirken können. Im Hinblick auf die Einhaltung des wasserrechtlichen Schutzzieles wurde die schädliche Verunreinigung des oberflächennahen Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften durch solche Stoffe geprüft und bewertet. Im Planfeststellungsbeschluss Konrad (Anhang 4: Gehobene wasserrechtliche Erlaubnis zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Endlager Konrad) sind die maximal einlagerbaren Massen nichtradioaktiver schädlicher Stoffe am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad festgeschrieben worden. Im Anhang IV der Endlagerungsbedingungen Konrad sind diese Massen in tabellarischer Form angegeben. In diesen Tabellen stehen die:

- Stoffe gemäß Liste I der Anlage zur Grundwasserversorgung (Tabelle 11)
- Stoffe gemäß Liste II der Anlage zur Grundwasserversorgung (Tabelle 12)
- Sonstige Stoffe, die schädliche Verunreinigungen im Sinne des § 137 NWG bewirken können (Tabelle 13)

Gemäß der Gehobenen wasserrechtlichen Erlaubnis hat das BfS die endzulagernden Abfälle in ihrer Zusammensetzung zu überwachen. Die tatsächlich eingelagerten Radionuklide, die in Tabelle 8 des Anhanges II der Endlagerungsbedingungen Konrad aufgeführt sind, und die nicht radioaktiven schädlichen Stoffe aus den Tabellen 11 bis 13 des Anhanges IV der Endlagerungsbedingungen Konrad sind nach ihrer Art und Menge fortlaufend zu erfassen und zu

bilanzieren. Schädliche Stoffe, die nachteilige Veränderungen im Sinne des § 137 NWG bewirken können, die nicht in der Gehobenen wasserrechtlichen Erlaubnis erfasst sind (und damit in den Tabellen 11 bis 13 der Endlagerungsbedingungen Konrad nicht aufgelistet sind), dürfen nicht zur Endlagerung gelangen. Für die bereits vorhandenen konditionierten Abfälle sind die Inhaltsstoffe der Gebinde abzuschätzen.

Die genannten Anforderungen in der Gehobenen wasserrechtlichen Erlaubnis sind durch weitere Festlegungen präzisiert:

- Zur Überwachung, Erfassung und Bilanzierung der Stoffe ist eine stoffliche Analyse der Gebindeinhalte nicht erforderlich. Die in den Tabellen 8 und 11 bis 13 genannten Stoffe sind mit den jeweiligen Mengen von den Ablieferungspflichtigen in Abfalldatenblättern schriftlich anzugeben.
- Bei Mengenermittlungen und der Bilanzierung unberücksichtigt bleiben die Stoffe, die in geringen Anteilen je Gebinde oder Charge als Spurenverunreinigungen enthalten sein können. Als Spurenverunreinigungen sind sowohl Stoffe gemäß den Tabellen 8 und 11 bis 13 als auch weitere Stoffe zu bewerten, deren Mengen nicht quantifizierbar sind. Die Spurenverunreinigungen dürfen nur in Mengen auftreten, dass nachteilige Veränderungen hierdurch im oberflächennahen Grundwasser mit Sicherheit ausgeschlossen sind.

Die Umsetzung der o.a. Anforderungen basiert auf der stofflichen Charakterisierung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, und zwar in Form von Stoffen, Verbindungen und Stoffvektoren. Diese Angaben sind in einer umfangreichen Stoffliste (Datenbank), die durch eine Behälterliste ergänzt wird, einschließlich Schwellenwerten zur Beschreibung der stofflichen Zusammensetzung (Beschreibungsschwellenwert) wie auch zur Erfassung und Bilanzierung der nichtradioaktiven schädlichen Bestandteile (Deklarationsschwellenwerte) enthalten.

Der Beschreibungsschwellenwert gibt den Massenanteil eines nichtradioaktiven Stoffes im Abfallstrom, Abfallprodukt und/oder Abfallbehälter an, bei dessen Überschreiten der betroffene Stoff für die Beschreibung der stofflichen Zusammensetzung eines Abfallgebundes oder einer Abfallcharge angegeben werden muss. Damit legt der Beschreibungsschwellenwert die Genauigkeit für die Aufschlüsselung und Beschreibung der nichtradioaktiven schädlichen Stoffe fest. Die verbindlichen Beschreibungsschwellenwerte für Stoffe, Verbindungen und Materialien sind in der Stoffliste angegeben.

Der Deklarationsschwellenwert gibt den Massenanteil eines nichtradioaktiven schädlichen Stoffes in einem Abfallgebinde oder in einer Abfallcharge an, bei dessen Unterschreitung nachteilige Veränderungen im oberflächennahen Grundwasser ausgeschlossen werden können. Bei Überschreitung der Deklarationsschwellenwerte werden diese Massenanteile bilanziert, bei Unterschreitung erfolgt keine Bilanzierung. Die Deklarationsschwellenwerte sind wie die Beschreibungsschwellenwerte in der Stoffliste angegeben. Lautet die Angabe eines Deklarationsschwellenwertes „>100“, so wird dieses Element bzw. diese Verbindung generell nicht bilanziert.

Bei der Anlieferung der Abfallgebinde an das Endlager Konrad ist eine Beschreibung der Gebinde vorausgesetzt. Diese Beschreibung beinhaltet Angaben zu:

- Gesamtaktivität des Abfallgebundes,
- Aktivität relevanter Radionuklide,
- Ortsdosisleistung an der Oberfläche und in 1 m bzw. 2 m Abstand,
- Flächenkontamination des Abfallgebundes,
- Abfallart,
- Fixierungsmittel,
- Abfallbehälter,
- Abfallproduktgruppe,
- Abfallbehälterklasse,
- Masse des Abfallgebundes und
- Stoffliche Zusammensetzung.

In der Genehmigungsunterlage zur Produktkontrolle radioaktiver Abfälle ist beschrieben, wie die Einhaltung der Anforderungen an Behälter bzw. Verpackungen sichergestellt wird. Dies geschieht durch

- Bauartprüfungen
- Begleitende Fertigungskontrollen
- Prüf- und Kontrollmaßnahmen bei der Abfallkonditionierung
- Ggf. Prüfungen an den Abfallgebinden

Die Prüf- und Kontrollmaßnahmen, durch die der Nachweis der Eignung eines bestimmten Behältertyps für die Endlagerung vor der Verwendung erbracht wird, werden einschließlich des Prüfzeugnisses für die Behälter als Bauartprüfung bezeichnet. Mit der Bauartprüfung wird vor der Serienfertigung und Verwendung der Abfallbehälter bzw. Verpackungen der Nachweis erbracht, dass die Bauart eines Abfallbehälters bzw. einer Verpackung die Endlagerungsbedingungen erfüllt.

Von der Bauartprüfung nicht betroffen sind die Anforderungen und Vorschriften aus dem Gefahrgutrecht. Allerdings können Nachweise nach dem Verkehrsrecht, die Anforderungen aus der Bauartprüfung abdecken, vom BfS anerkannt werden.

Im Rahmen der Bauartprüfungen werden die begleitenden Fertigungskontrollen, die Maßnahmen bei der Konditionierung und ggf. Prüfungen an den Abfallgebinden vom BfS festgelegt.

Alle Festlegungen, die aus der Bauartprüfung resultieren, sind während der Fertigung der Endlagerbehälter, während der Abfallkonditionierung und ggf. später bei weiteren Prüfungen an den Abfallgebinden zu erfüllen, damit die Gebinde endlagerungsfähig sind.

3.4 Zusammenfassende Bewertung

Die vorgenannten Gesetze, Verordnungen und Regelungen zeigen deutlich den Handlungsspielraum und die Grenzen bei der Zwischenlagerung, bei der Beförderung und bei der Endlagerung auf. Während der Handlungsspielraum bei der Zwischenlagerung sehr groß ist, gibt es konkrete Anforderungen an die Behälter und den radioaktiven Abfall, insbesondere bei der enthaltenen Aktivität, bei der Beförderung und bei der Endlagerung im Endlager Konrad. Für ein zukünftiges Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente existieren derzeit keine präzisen Anforderungen wie für das Endlager Konrad. Diese Handlungsspielräume und Grenzen sind auch bei der Vorbereitung und Planung von Zwischenlagerung, Transport und Endlagerung des Graphit/Kohlesteins zu beachten.

4 Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Graphit/Kohlestein

Auf Grundlage der im Kapitel 2 ermittelten Massen, Aktivitäten und Volumina des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren wurden nachfolgend die rechtlichen Möglichkeiten und Begrenzungen (s. Kapitel 3) zur Zwischenlagerung, zum Transport und zur Endlagerung untersucht.

Wie im Kapitel 3.1 beschrieben, können in den Genehmigungen zur Zwischenlagerung individuelle Behältertypen, Aktivitäten, Massen und Volumina zugelassen werden. Die einzelnen Genehmigungen für die Zwischenlager, in denen der in Deutschland zu entsorgende Graphit/Kohlestein derzeit oder zukünftig eingelagert wird, sind der Obhut der Betreiber. Sie sind nicht öffentlich zugänglich. Aus diesem Grund kann keine Aussage darüber getroffen werden, inwieweit der Graphit/Kohlestein die Genehmigungen für ein Zwischenlager erfüllt. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass eine Zwischenlagerung des Graphits/Kohlesteins möglich ist, wie der bereits im Zwischenlager der PTB eingelagerte Graphit des FMRB belegt.

Für den Transport ist die Wahl des passenden Versandstückes ausschlaggebend. Das heißt, es muss bei der Behälterauswahl darauf geachtet werden, dass dieses für den Inhalt die notwendige Zulassung besitzt. Sollten die Aktivitätsgrenzwerte pro Behälter über den Grenzwerten der Typ-A-Verpackung liegen, so ist eine Typ B(U)-Verpackung zu wählen. Die Grenzwerte einer Typ-B(U)-Verpackung sind so individuell, dass es auf die einzelne Zulassung des Behälters ankommt, ob der Graphit/Kohlestein darin verpackt werden kann. Falls die Aktivität des Graphits/Kohlesteins pro Behälter so groß ist, dass die Grenzwerte für die Ortsdosisleistung nicht eingehalten werden, so sind Verpackungen mit zusätzlicher Abschirmung zu benutzen oder aber die Menge an Graphit/Kohlestein pro Behälter zu reduzieren.

Um Wiederholungen in den nachfolgenden Kapiteln zu vermeiden, werden für den Graphit aus den einzelnen Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren ein paar allgemeingültige Aspekte aus den Endlagerungsbedingungen näher erläutert.

In den Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ ist festgelegt, dass die einzelnen Abfallbehälter nur bestimmte Mengen bzw. Aktivitäten an Kernbrennstoffen enthalten dürfen. Während bei den Forschungsreaktoren kein Kernbrennstoff nach der Stilllegung mehr vorhanden ist, so konnten bei beiden Hochtemperaturreaktoren die Brennelementkugeln nicht komplett entfernt werden und sind zusammen mit dem Graphit/Kohlestein zu entsorgen. Dabei ist für beide Reaktoren im Einzelfall zu überprüfen, ob sie die Grenzwerte aus den Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ erfüllen.

Des Weiteren ist in den Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ festgelegt, dass sobald in einem Abfallgebinde Graphit vermischt bzw. unvermischt mit spaltbaren Stoffen gewisse Massengrenzen für den Graphit und Aktivitätswerte für die Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 überschreiten, eine Einzelfallprüfung durch das BfS notwendig wird. Dies trifft für beide Hochtemperaturreaktoren zu, weil noch Brennelementbruchstücke im Reaktor lagern bzw. lagern können.

Der Graphit/Kohlestein erfüllt die Grundanforderungen für die Abfallprodukte aus den Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/. Er liegt in fester Form vor, fault und gärt nicht und enthält keine Flüssig- oder gasgefüllten Behältnisse sowie freie Flüssigkeiten oder Gase. Des Weiteren sind keine selbstentzündlichen oder explosiven Stoffe enthalten. Bei den Endlagerbehältern, die Brennelementkugeln aus den Hochtemperaturreaktoren beinhalten, kann mit der Wahl des Endlagerbehälters, des Konditionierungsverfahrens und des maximalen Graphit-/Kohlesteinvolumens die Anforderungen an die maximalen Massenkonzentrationen, den Spaltstoffgehalt und dessen eventuelle Fixierung in einer Abfallmatrix eingehalten werden.

Der Graphit/Kohlestein kann mindestens in die Abfallproduktgruppe APG 01 eingeordnet werden. Ob der Graphit/Kohlestein die Anforderungen an eine höhere APG erfüllt, muss anhand der Eigenschaften des Graphits/Kohlesteins bewertet werden. Um die maximalen Grenzwerte der APG 06 ausnutzen zu können, ist es möglich den Graphit/Kohlestein in Endlagerbehälter der Abfallbehälterklasse ABK I störfallfest zu verpacken. Sollen die maximalen Grenzwerte der ABK II ausgeschöpft werden, so sind Endlagerbehälter der Abfallbehälterklasse ABK II zu verwenden.

Resultierend aus der Sicherheitsanalyse für den bestimmungsgemäßen Betrieb des Endlagers Konrad sind Garantiewerte für einzelne Radionuklide und Radionuklidgruppen pro Abfallgebinde festgeschrieben worden. Zu diesen Radionukliden gehört auch das im Graphit enthaltene C-14. Für C-14 sind Grenzwerte abhängig von der prozentualen Freisetzung pro Behälter festgelegt worden. Diese Werte sind unabhängig von der spezifizierten Dichtheit der Verpackung. Da nicht bekannt ist, in welcher flüchtigen Form der Graphit/Kohlestein vorliegt, werden in diesem Bericht alle möglichen flüchtigen Formen betrachtet.

Die maximal in das Endlager Konrad einlagerbare Aktivität an C-14 beträgt $4,0 \text{ E}+14 \text{ Bq}$. Legt man nun die $1,8 \text{ E}+08 \text{ Bq}$ pro Endlagergebinde gemäß Tabelle 3-3 für unspezifiziertes C-14 zu Grunde, so kommt man auf eine Anzahl von über 2 Millionen Endlagerbehälter mit C-14. Unter Berücksichtigung eines Mindestvolumens der Endlagerbehälter von $0,7 \text{ m}^3$ (Gussbehälter Typ I) ergibt das ein Volumen von über 1,4 Millionen m^3 . Da das Endlager Konrad für 303.000 m^3 genehmigt ist, übersteigen die 1,4 Millionen m^3 das genehmigte Volumen um mehr als das 4-fache. Aus diesem Grund ist es für die Endlagerbehälter mit Graphit/Kohlestein unabdingbar, die spezifische flüchtige Form des C-14 zu bestimmen. Diese sollte $< 1 \%$ sein, damit die maximal einlagerbare Aktivität an C-14 voll ausgeschöpft werden kann.

4.1 Graphit aus dem Ausbildungsreaktor Dresden (AKR-2)

Im AKR-2 werden im Augenblick 730 kg Graphit als Neutronenreflektor verwendet. Des Weiteren besitzt der AKR-2 570 kg Graphit als Reserve. Sowohl für den im Einsatz befindlichen Graphit als auch für die Reserve liegen keine genauen Informationen zu den enthaltenen Aktivitäten vor. Es kann aufgrund der Betriebsweise des AKR-2 nicht ausgeschlossen werden, dass die Aktivitäten unterhalb der Freigrenze liegen. Da dies zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht bekannt ist, wird im Rahmen dieses Vorhabens davon ausgegangen, dass der gesamte Graphitbestand des AKR-2 für eine Endlagerung zu berücksichtigen ist. Inwieweit

die Aktivitäten des Graphits die Endlagerungsbedingungen Konrad einhalten, ist im Augenblick nicht bekannt.

Mögliche Verpackungskonzepte des Graphits aus dem AKR-2 werden im Kapitel 5 beschrieben.

4.2 Graphit/Kohlestein aus dem Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) Jülich

Die C-14-Aktivität von 2,8 E14 Bq im Kohlestein des AVR beträgt über 70 % der maximal einlagerbaren Aktivität an C-14 am Ende der Betriebsphase des Endlager Konrad /BfS 2010a/. Da der Graphit/Kohlestein nicht der einzige C-14-haltige radioaktive Abfall ist, wird davon ausgegangen, dass der Kohlestein des AVR nicht im Endlager Konrad eingelagert werden kann.

Der Graphit sowie die darin eingeschlossenen Neutronenquellen und die Brennelementbruchstücke sind technisch nur sehr bedingt vom Kohlestein zu trennen. Daher werden auch diese Mengen als „nicht konradgängig“ angesehen /EWN 2011/.

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 2010/ sind lediglich Angaben zur Dauer der Integrität der Behälter enthalten. Da jedoch keine Endlagerungsbedingungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente derzeit existieren, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob der Graphit/Kohlestein aus dem AVR diese erfüllen wird.

Mögliche Verpackungskonzepte des Graphits/Kohlesteins aus dem AVR werden im Kapitel 5 beschrieben.

Wie im Kapitel 2.2 beschrieben, sieht die EWN vor, den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und den Kernbrennstoff (siehe Tabelle 2-3) konradgerecht zu konditionieren. Es handelt sich hierbei um insgesamt 364 Mg an Porenleichtbeton. Bei einer unterstellten Dichte des Porenleichtbetons von 0,8 g/cm³ ergibt das 455 m³ an Porenleichtbeton /AVR 2009/. In diesen Porenleichtbeton sind insgesamt 98 g Kernbrennstoff eingebunden. Wie die Verteilung des Kernbrennstoffes und des Graphitstaubes in dem Porenleichtbeton ist, ist derzeit unbekannt. Aus diesem Grund wird von einer homogenen Verteilung ausgegangen. Dies wird bei dem folgenden Abgleich mit den Endlagerungsbedingungen Konrad betrachtet.

Mit den insgesamt 5,33 E+11 Bq an C-14 muss der Graphit unabhängig davon, welcher Nachweis an spezifizierte flüchtige Form des C-14 erbracht werden kann, oder nicht, in mehrere Behälter verpackt werden.

Ein Vergleich des im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaubs und Kernbrennstoffs des AVR mit den Endlagerungsbedingungen Konrad zeigt, dass die Grenzwerte für den Störfall bei Verpackung des Porenleichtbetons in Abfallbehälter der ABK II eingehalten werden. Die Grenzwerte für die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und der spaltbaren Stoffe außer Natururan werden eingehalten.

Gemäß den Grundanforderungen für die Abfallprodukte müssen brennbare radioaktive Abfälle, die spaltbare Stoffe außer Natururan und abgereichertem Uran mit einer Masse von mehr als 1 g pro Abfallgebinde enthalten, in einer nicht brennbaren Abfallmatrix fixiert, allseitig von einer inaktiven Schicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von mindestens 0,1 m²K/W umgeben sein oder der Abfallbehälterklasse II zugeordnet sein. Im Porenleitbeton des AVR sind insgesamt 98 g Kernbrennstoff eingeschlossen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass pro Behälter nicht mehr als 1 g Brennstoff verpackt wird. Da der Porenleichtbeton des AVR sowieso in Abfallbehälter der ABK II verpackt werden muss, da diese ansonsten die Grenzwerte für den Störfall nicht einhalten, kann dieser Punkt der Grundanforderung eingehalten werden. Bei mehr als 15 g Spaltstoff muss der Ablieferungspflichtige den Nachweis erbringen, dass bei thermischer Belastung des Abfallgebundes eine lokale Aufkonzentrierung ausgeschlossen werden kann. Da derzeit nicht ausgeschlossen werden kann, dass pro Behälter 15 g Spaltstoff gepackt werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser Nachweis erbracht werden muss.

Gemäß den Endlagerungsbedingungen Konrad ist eine Einzelfallprüfung durch das BfS erforderlich, wenn die Aktivität von U-233 den Wert von 1,8 E+09 Bq/Abfallgebinde und die Aktivitäten von U-235, Pu-239 und PU-241 1% der zugehörigen Aktivitätsgrenzwerte aus der Tabellen 7a/7b aus Anhang II der Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ übersteigen und das betreffende Abfallgebinde mehr als 27,5 kg D₂O, 36 kg Beryllium oder 42 kg Graphit, vermischt mit spaltbaren Stoffen, oder mehr als 275 kg D₂O, 360 kg Beryllium oder 420 kg Graphit unvermischt mit spaltbaren Stoffen, enthält. Der Kernbrennstoff des AVR ist in einer Graphitkugel eingeschlossen /DBETEC 2011/. Leider ist unbekannt, wieviel Graphitstaub im Porenleichtbeton eingebunden ist. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass diese Mengen so gering sind, dass die 42 kg Graphit pro Behälter nicht überschritten werden.

Mögliche Verpackungskonzepte des im Porenleichtbeton eingeschlossenen Graphitstaubs und des Kernbrennstoffes aus dem AVR werden im Kapitel 5 beschrieben.

4.3 Graphit aus dem Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)

Die knapp 1.500 kg Graphit des FMRB, die in fünf 200-l- und einem 400-l-Fass im Zwischenlager der PTB in Braunschweig gelagert sind, erfüllen derzeit aufgrund ihrer Verpackung die Endlagerungsbedingungen Konrad nicht. Sie müssen in Behälter, die für das Endlager Konrad zugelassen sind, verpackt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass pro Abfallgebinde die Aktivitätsgrenzwerte eingehalten werden.

Bis auf C-14 und H-3 sind die weiteren Aktivitäten des Graphits aus dem FMRB unbekannt. Aus diesem Grund kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Aktivitätsgrenzwerte der Endlagerungsbedingungen Konrad für den Störfall, die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und die spaltbaren Stoffe außer Natururan (siehe Tabelle 3-4 bis Tabelle 3-6) eingehalten werden.

Mit den insgesamt 1,6 E+09 Bq an C-14 für den gesamten Graphitbestand, ist dieser nur dann in einen Endlagerbehälter zu verpacken, wenn eine spezifizierte flüchtige Form des Graphits von > 1 % und < 10 % nachgewiesen werden kann (siehe Tabelle 3-3). Ist dies nicht möglich, ist der Graphit in mehrere Behälter zu verpacken.

Mögliche Verpackungskonzepte des Graphits aus dem FMRB werden im Kapitel 5 beschrieben.

4.4 Graphit aus dem Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)

Die ca. 6,35 Mg Graphit des FRF, die in dreißig 200-l-Fässer in der Landessammelstelle Hessen gelagert sind, erfüllen derzeit aufgrund ihrer Verpackung die Endlagerungsbedingungen Konrad nicht. Sie müssen in Behälter, die für das Endlager Konrad zugelassen sind, verpackt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass pro Abfallgebinde die Aktivitätsgrenzwerte eingehalten werden.

Für den Graphit des FRF liegt bei der Landessammelstelle Hessen eine umfangreiche Deklaration des Nuklid- und Aktivitätsinventars vor. Gemäß Ihrem Schreiben vom 31. März 2015 teilte das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz folgenden Sachverhalt bzgl. der Endlagerfähigkeit in Konrad für die dreißig 200-l-Fässer mit /HMUKLV 2015/:

In seiner Stellungnahme vom 20.06.2012 bewertet das Bundesamt für Strahlenschutz BfS die radioaktiven Abfälle als endlagerfähig im Endlager Konrad (nach Einbringung der Fässer in geeignete Abfallbehälter/Container).

Der gesamte Graphitbestand mit den insgesamt 3 E+09 Bq an C-14 kann nur dann in ein Endlagerbehälter verpackt werden, wenn eine spezifizierte flüchtige Form des Graphits von < 1 % nachgewiesen werden kann (siehe Tabelle 3-3). Da aber maximal 26 200-l-Fässer in einen Container Typ V aus Stahlblech, den größten Container, verpackt werden können, müssen die Fässer sowieso auf mehrere Endlagerbehälter aufgeteilt werden. Dabei ist dann zu berücksichtigen, welche flüchtige Form der Graphit besitzt.

Mögliche Verpackungskonzepte des Graphits aus dem FRF werden im Kapitel 5 beschrieben.

4.5 Graphit aus der Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2 (FRG-1/-2), Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN), Jülich 2 (FRJ-2, DIDO) und München (FRM)

In den einzelnen Forschungsreaktoren wurden insgesamt die folgenden Menge an Graphit verwendet:

- 11,11 Mg im FRG-1/-2
- 12,94 Mg im FRJ-1
- 30,00 Mg im FRJ-2
- 0,247 Mg im FRM

Für diese Mengen liegen keine Informationen zu den enthaltenen Aktivitäten vor. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Aktivitäten des Graphits unterhalb der Freigrenze liegen. Da dies zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht bekannt ist, wird davon ausgegangen, dass der gesamte Graphitbestand dieser Forschungsreaktoren für eine Endlagerung vorzusehen ist. Eine Aussage inwieweit die Aktivitäten des Graphits die Endlagerungsbedingungen Konrad einhalten, ist aufgrund fehlender Aktivitätsangaben nicht möglich.

Mögliche Verpackungskonzepte des Graphits aus diesen Forschungsreaktoren werden im Kapitel 5 beschrieben.

4.6 Graphit aus dem Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)

Insgesamt wurden im FRN 27,7 Mg bzw. 15,4 m³ an Graphit eingebaut. Dieser Graphit ist während der Betriebszeit des Reaktors kontaminiert worden. Über eine etwaige Aktivierung des Graphits liegen keine Daten vor.

Für den FRN liegen nur die Aktivitäten für die Nuklide Co-60, Cs-137 und Eu-152 vor. Dies ist nicht ausreichend, um eine Aussage darüber zu treffen, ob der Graphit des FRN die Aktivitätsgrenzwerte der Endlagerungsbedingungen für den bestimmungsgemäßen Betrieb, für den Störfall, die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und die spaltbaren Stoffe außer Natururan eingehalten werden kann.

Mögliche Verpackungskonzepte des Graphits aus dem FRN werden im Kapitel 5 beschrieben.

4.7 Graphit aus dem Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und dem Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)

Die Masse des Graphits aus dem RFR und dem RRR beträgt insgesamt ca. 3,055 Mg. Diese teilt sich in 6 Graphitblöcke auf. Für jeden dieser Blöcke sind die Massen und die Aktivitäten bekannt (siehe Tabelle 2-6).

Die Graphitblöcke VKTA0004802 bis VKTA0004806 erfüllen alle Aktivitätsgrenzwerte der Endlagerungsbedingungen für den bestimmungsgemäßen Betrieb auch für C-14 unspezifiziert, für die Störfallanalyse, für die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und für die spaltbaren Stoffe außer Natururan. Nuklide, die in der Tabelle 2-6 aufgelistet sind, aber nicht in den Tabellen 3-3 bis 3-6 besitzen entweder eine Halbwertszeit von mehreren Sekunden bzw. Minuten und sind daher nicht zu berücksichtigen oder sind als weitere Radionuklide in der Tabelle 10 der Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ aufgelistet. Auch die weiteren Radionuklide erfüllen die für sie geltenden Aktivitätsgrenzwerte. Die Graphitblöcke VKTA0004802 bis VKTA0004806 können gemeinsam in einen Endlagerbehälter verpackt werden. Mögliche Verpackungskonzepte dieser Graphitblöcke werden in Kapitel 5 beschrieben.

Der Graphitblock VKTA0003418 hält die Aktivitätsgrenzwerte der Endlagerungsbedingungen für die Störfallanalyse, für die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und für die spalt-

baren Stoffe außer Natururan ein. Der Grenzwert für C-14 beim bestimmungsgemäßen Betrieb wird nur dann eingehalten, wenn eine spezifizierte flüchtige Form des C-14 von > 1 % und < 10 % nachgewiesen werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss das Graphit in mehrere Endlagerbehälter verpackt werden. Mögliche Verpackungskonzepte dieses Graphitblocks werden in Kapitel 5 beschrieben.

4.8 Graphit aus dem Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR 300)

Die Aktivität des Graphits aus dem THTR 300 und dem Abbrandmessreaktor macht etwa 1,25 % der für das Endlager Konrad maximal genehmigten Aktivität an C-14 aus. Je nachdem ob der Graphit unspezifiziert oder die flüchtige Form spezifiziert wird, müssen mehr Endlagergebinde in das Endlager Konrad eingelagert werden und es wird mehr Volumen für die Endlagergebinde mit Graphit des THTR 300 und des Abbrandmessreaktors benötigt.

Zusätzlich zu dem Graphit sind noch 63,021 Mg Graphit- und Absorberelemente (Kugeln) mit einer Aktivität von $5,78 \text{ E}+11 \text{ Bq}$ an C-14 im THTR 300 zwischengelagert. Auch für die Graphit- und Absorberelemente gilt, dass je nachdem ob das C-14 unspezifiziert oder der Nachweis für eine flüchtige Form spezifiziert erteilt wird, ändert sich die Anzahl der Endlagerbehälter und damit der Volumina, die ins Endlager Konrad eingelagert werden müssten.

Bis auf C-14 und H-3 sind die weiteren Aktivitäten des Graphits aus dem THTR 300 und den Graphit- und Absorberelementen unbekannt. Aus diesem Grund kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Aktivitätsgrenzwerte der Endlagerungsbedingungen Konrad für den Störfall, die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins und die spaltbaren Stoffe außer Natururan (siehe Tabelle 3-4 bis Tabelle 3-6) eingehalten werden. Mögliche Verpackungskonzepte für den Graphit aus dem THTR 300 und die Graphit- und Absorberelemente werden im Kapitel 5 dargestellt. In diesem Kapitel werden auch die unterschiedlichen Anzahlen an Endlagerbehälter für unspezifiziert bzw. flüchtige Form spezifiziert dargestellt.

Der THTR 300 ist vom gleichen Reaktortyp wie der AVR, lediglich die Leistung ist höher. Da beim AVR beim Entleeren des Reaktorkerns nicht alle Brennelementkugelbruchstücke entfernt werden konnten, wird davon ausgegangen, dass dies beim THTR 300 ebenfalls so ist. Aus diesem Grund gelten dieselben Anforderungen gemäß den Endlagerungsbedingungen Konrad für die Brennelementkugelbruchstücke im Reaktorkern des THTR 300. Das heißt, bei mehr als 1 g pro Abfallgebinde müssen brennbare radioaktive Abfälle in einer nicht brennbaren Abfallmatrix fixiert, allseitig von einer inaktiven Schicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von mindestens $0,1 \text{ m}^2\text{K/W}$ umgeben sein oder der Abfallbehälterklasse II zugeordnet sein. Des Weiteren muss bei mehr als 15 g Spaltstoff pro Endlagergebinde der Ablieferungspflichte den Nachweis erbringen, dass bei thermischer Belastung des Abfallgebundes eine lokale Aufkonzentrierung ausgeschlossen werden kann. Darüber hinaus ist gemäß den Endlagerungsbedingungen Konrad eine Einzelfallprüfung durch das BfS erforderlich, wenn die Aktivität von U-233 den Wert von $1,8 \text{ E}+09 \text{ Bq/Abfallgebinde}$ und die Aktivitäten von U-235, Pu-239 und Pu-241 1% der zugehörigen Aktivitätsgrenzwerte aus der Tabellen 7a/7b aus Anhang II der Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ übersteigen und das betreffende Abfallgebinde mehr als 27,5 kg D_2O , 36 kg Beryllium oder 42 kg Graphit vermischt mit spaltbaren Stoffen oder mehr als 275 kg D_2O , 360 kg Beryllium oder 420 kg Graphit unver-

mischt mit spaltbaren Stoffen enthält. Da der Kernbrennstoff des THTR 300 in einer Graphitkugel eingeschlossen ist /DBETEC 2011/ und pro Behälter voraussichtlich mehr als 42 kg Graphit erwartet werden können, muss geprüft werden, ob die oben genannten Aktivitätsgrenzwerte der spaltbaren Stoffe eingehalten werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anreicherung des Kernbrennstoffes des THTR 300 $> 5 \%$ beträgt /DBETEC 2011/. Es liegen derzeit keine Informationen darüber vor, wieviel Gramm an Kernbrennstoff bzw. an Brennelementkugelbruchstücken im Reaktorkern des THTR 300 verblieben sind. Aus diesem Grund kann keine Bewertung erfolgen, ob bzw. wie die Brennelementkugelbruchstücke die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen können. Sie werden daher bei der Entwicklung von möglichen Verpackungskonzepten nicht berücksichtigt.

Im Kapitel 5 werden mögliche Verpackungskonzepte für den Graphit des THTR 300 und der Graphit- und Absorberelemente beschrieben.

4.9 Graphit aus weiteren Forschungsreaktoren

Da für die im Kapitel 2.13 aufgeführten Reaktoren zum größten Teil keine Angaben über Massen und keine Angaben zu den Aktivität vorliegen, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob sie die Endlagerungsbedingungen Konrad /BfS 2010a/ erfüllen. Für die im Kapitel 2.13 angenommen Graphit-Massen werden im Kapitel 5 mögliche Verpackungskonzepte für beschrieben.

5 Auswahl und Beschreibung von möglichen Konditionierungsverfahren und Behälterkonzepten

Im Folgenden werden für den Graphit/Kohlestein aus den beiden Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR 300 und aus den Forschungsreaktoren in Deutschland mögliche Konditionierungsverfahren und Behälterkonzepte beschrieben. Für den Graphit aus dem THTR 300 und den Forschungsreaktoren sowie den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR geschieht das im Hinblick auf eine Einlagerung im Endlager Konrad.

Für den Graphit/Kohlestein des AVR werden Konzepte für eine Einlagerung in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente beschrieben. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel noch weitere C-14-haltige Abfälle beschrieben. Es werden – falls vorhanden – deren Aktivitäten genannt und beschrieben, ob all diese Abfälle in das Endlager Konrad eingelagert werden können oder welche Problemstellung mit den zusätzlichen C-14 haltigen Abfällen auftreten können.

Die Entsorgung von Graphit/Kohlestein ist kein rein deutsches Problem. Es wurde auch im Ausland in kleinen Mengen in Forschungsreaktoren und in größeren Mengen in kommerziell betriebenen Kernkraftwerken eingebaut. Es wird abgeschätzt, dass weltweit etwa 250.000 Mg, vorwiegend in der EU, zu entsorgen sind. Um Lösungswege für die Konditionierung bzw. Verpackung und die Endlagerung des Graphits zu entwickeln, wurde 2008 ein Konsortium aus 28 Mitgliedern gegründet, das sich mit dieser Aufgabe unter dem Namen „Treatment and Disposal of Irradiated Graphite and other Carbonaceous Waste (CARBOWASTE)“ beschäftigte /CARBOWASTE 2012/.

Um den sichersten und wirtschaftlichsten Konditionierungsweg für den Graphit zu identifizieren, laufen derzeit viele Untersuchungen. Die Nuclear Decommissioning Authority (NDA) in Großbritannien hat im Zuge ihres Programmes mögliche Konditionierungskonzepte untersucht, und dabei festgestellt, dass verschiedene Möglichkeiten zur Konditionierung gibt. Eine Aussage darüber welche Möglichkeit die sicherste und wirtschaftlichste ist, gibt es nicht /NDA 2013/.

In dem Bericht der NDA „Higher Activity Waste – Strategic Position Paper on the Management of Waste Graphite“ sind die derzeit bevorzugten Optionen zur Abfallbehandlung des Graphits an drei Standorten beschrieben worden. Am Standort Berkeley soll der Graphit als mittlerradioaktiver Abfall (Intermediate Level Waste, ILW) in belastbare, selbstabschirmende Behälter (Gussbehälter) für die Zwischenlagerung verpackt und unfixiert endgelagert werden. Am Standort Hunterston A soll der Graphit als ILW in Edelstahlbehältern verpackt zwischengelagert und fixiert (z.B. zementiert) endgelagert werden. Am Standort Sellafield soll der Graphit als ILW in Fässern aus Bau- oder Edelstahl verpackt zwischengelagert und fixiert endgelagert werden /NDA 2014/.

Da es in Deutschland kein Verpackungskonzept für den Graphit/Kohlestein gibt, wird im ersten Ansatz Kredit von den derzeit geplanten Konditionierungen und Verpackungen aus dem Bericht der NDA /NDA 2014/ genommen. In allen drei Fällen ist es vorgesehen, Metallbehälter zu verwenden. Aus diesem Grund werden als Endlagerbehälter für den

Graphit/Kohlestein Container aus Baustahl (Werkstoff 1.0038) oder bei geringeren Volumina Gussbehälter ausgewählt. Sollte die Dosisleistung so hoch sein, dass die Grenzwerte nicht eingehalten werden können, kann so anstatt Stahl auch Gusseisen verwendet werden oder aber eine Abschirmung aus Beton oder Blei in die Stahlbehälter gebaut werden. Eine Verfüllung der Resthohlräume, und damit eine Fixierung des Graphits/Kohlesteins im Endlagerbehälter wird vorgenommen, um die Anforderungen an ein möglichst vollständiges Befüllen des Abfallbehälters (siehe Kapitel 4.5 in den Endlagerungsbedingungen /BfS 2010/) zu gewährleisten. Bei allen Verpackungsarten ist darauf zu achten, dass die maximalen Gebindemassen von 10 Mg für die Gussbehälter und 20 Mg für die Container nicht überschritten werden.

Da bislang keine Aussagen darüber existieren welches Konditionierungs- und Verpackungskonzept für den Graphit/Kohlestein als geeignet oder ungeeignet erscheint, sind die hier vorgeschlagene Konditionierungs- und Verpackungskonzepte als vorläufig anzusehen.

5.1 Graphit aus dem Ausbildungsreaktor Dresden (AKR-2)

Wie im Kapitel 4.1 beschrieben, ist eine Aussage darüber, ob der Graphit des AKR-2 die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen wird, nicht möglich. Aus diesem Grund werden in Behälterkonzepte gewählt, in die der Graphit des AKR-2 aufgrund seines Volumens bzw. seiner Masse verpackt werden kann.

Für den AKR-2 sind zwei Graphitblöcke zu berücksichtigen. Der erste Graphitblock hat eine Masse von ca. 730 kg und einem Volumen von 0,43 m³. Der zweite Graphitblock hat eine Masse von 570 kg und ein Volumen von 0,34 m³. Die Verpackung der beiden Graphitblöcke des AKR-2 kann auf zwei unterschiedliche Weisen geschehen. Zum einen kann jeder Graphitblock einzeln in einen Endlagerbehälter verpackt werden. Als Endlagerbehälter ist für beide Blöcke ein Gussbehälter Typ II möglich. Sollte die Geometrie der Blöcke so sein, dass sie nicht in den Gussbehälter Typ II passen, könnten sie entweder zurechtgeschnitten werden oder aber ein größere Behälter – z.B. ein Container Typ I – gewählt werden. Zum anderen können beide Graphitblöcke in einen einzigen Endlagerbehälter verpackt werden. Als Endlagerbehälter hierfür ist ein Container Typ I vorgesehen.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des AKR-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-1 Spezifizierung eines Endlagerbehälters für die Graphitblöcke des AKR-2 einzeln

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ II
Volumen brutto	1,3 m ³
Volumen netto	0,49 m ³
Anzahl	2
Abfallgebindevolumen brutto	2,6 m ³

Tabelle 5-2 Spezifizierung des Endlagerbehälters für beide Graphitblöcke des AKR-2

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ I (Stahl)
Volumen brutto	3,9 m ³
Volumen netto	1,6 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	3,9 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit des AKR-2 gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des AKR-2 andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.2 Graphit/Kohlestein aus dem Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich (AVR)

Wie im Kapitel 4.2 beschrieben, wird aufgrund der Tatsache, dass die Aktivität im Graphit/Kohlestein des AVR über 70 % der maximal einlagerbaren Aktivität an C-14 am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad beträgt, davon ausgegangen, dass dieser nicht in das Endlager Konrad eingelagert wird. Bislang existieren keine Endlagerungsbedingungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente. Aus diesem Grund kann derzeit nicht gesagt werden, welche Behältertypen für dieses Endlager zugelassen sein werden. Da die Schachtförderkapazität in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente größer sein wird als für das Endlager Konrad, ist eine analoge Gewichtsbeschränkung nicht vorgesehen. Daher wäre es möglich, sowohl die Behältertypen, die für das Endlager Konrad genehmigt sind, als neu entwickelte Großbehälter, die nicht den Gewichts- und Abmessungsbeschränkungen des Endlagers Konrad unterliegen, zu verwenden. Da bislang keine konkreten Konzepte für die Großbehälter existieren, werden in diesem Bericht Endlagerbehälter ausgewählt, die für das Endlager Konrad zugelassen sind. Ihre Hauptfunktion besteht darin, die in ihnen verpackten radioaktiven Abfällen während des Transportes vom Ablieferungspflichtigen zum Endlager und bei der Handhabung im Endlager sicher zu umschließen. Für diese Behälter ist also sichergestellt, dass sie die Anforderungen an den Transport erfüllen werden. Ob diese Behälter die Endlagerungsbedingungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente erfüllen werden, kann erst dann festgestellt werden, wenn solche Endlagerungsbedingungen existieren.

Die EWN sieht eine Verpackung der graphit-/kohlesteinhaltigen Abfälle in 200-l-Fässern vor. Dabei entstehen ca. 1.010 Fässer mit einem Bruttovolumen von 280 m³ (0,27 m³/Fass). Des Weiteren ist ggf. eine Zwischenlagerung der Fässer in Konrad Container Typ IV vorgesehen. Grundsätzlich ist man von Seiten der EWN noch frei in der Wahl der Verpackung /EWN 2011/.

Als Endlagerbehälter für den Graphit/Kohlestein des AVR wird im Rahmen dieses Vorhabens der Konrad Container Typ IV aus Stahl betrachtet. In einen Konrad Container Typ IV aus

Stahl können 14 Stück 200-l-Fässer verpackt werden. Damit lässt sich die Anzahl an Konrad Container Typ IV auf 73 Stück errechnen.

Die EWN sieht vor, den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff konradgerecht zu konditionieren. Wie im Kapitel 4-2 beschrieben, erfüllt der im Porenleichtbeton eingebundene Graphitstaub und Kernbrennstoff die Endlagerungsbedingungen Konrad. Er muss je nachdem welcher Nachweis für die spezifizierte flüchtige Form des C-14 erbracht werden kann oder nicht, in eine unterschiedliche Anzahl an Endlagerbehältern verpackt werden. Es wird bei den folgenden Verpackungsvarianten davon ausgegangen, dass der Graphitstaub und der Kernbrennstoff homogen im Porenleichtbeton verteilt ist, ebenso wie deren Aktivitäten.

Ist der Nachweis erbracht, dass eine spezifizierte flüchtige Form des C-14 von $\leq 1 \%$ vorliegt und damit $1,8 \text{ E}+10 \text{ Bq}$ an C-14 pro Behälter enthalten sein dürfen, müssen die $5,33 \text{ E}+11 \text{ Bq}$ auf mindestens 30 Behälter aufgeteilt werden. Da die insgesamt 455 m^3 Porenleichtbeton unter Verwendung des größten für das Endlager Konrad zugelassenen Container Typ V bei einem unterstellten Innenvolumen von $9,8 \text{ m}^3$, auf mindestens 47 Behälter aufgeteilt werden müssen, wird die Anzahl von 30 Behältern auf jeden Fall eingehalten.

Kann der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form des C-14 von $\leq 1 \%$ nicht erbracht werden, dafür aber der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form des C-14 von $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$ und damit $1,8 \text{ E}+09 \text{ Bq}$ pro Behälter enthalten sein dürfen, müssen die $5,33 \text{ E}+11 \text{ Bq}$ auf mindestens 297 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 364 Mg bzw. 455 m^3 Porenleichtbeton eine Menge von ca. 1.226 kg bzw. von ca. $1,5 \text{ m}^3$ pro Behälter. Diese Menge an Porenleichtbeton kann in einen Container Typ I aus Stahl verpackt werden.

Sind diese Nachweise nicht zu erbringen, dürfen maximal $1,8 \text{ E}+08 \text{ Bq}$ an C-14 pro Behälter enthalten sein und die $5,33 \text{ E}+11 \text{ Bq}$ müssen auf mindestens 2.962 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 364 Mg bzw. 455 m^3 Porenleichtbeton eine Menge von ca. 123 kg bzw. von ca. $0,15 \text{ m}^3$ pro Behälter. Diese Menge an Porenleichtbeton kann in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits/Kohlesteins und des im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoffes des AVR zusammengefasst.

Tabelle 5-3 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphit/Kohlestein des AVR

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ IV (Stahl)
Volumen brutto	$7,4 \text{ m}^3$
Volumen netto	$6,5 \text{ m}^3$
Anzahl	73
Abfallgebindevolumen brutto	$540,2 \text{ m}^3$

Tabelle 5-4 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei C-14 spezifiziert $\leq 1\%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ V (Stahl)
Volumen brutto	10,9 m ³
Volumen netto	9,8 m ³
Anzahl	47
Abfallgebindevolumen brutto	512,3 m ³

Tabelle 5-5 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei C-14 spezifiziert $> 1\%$ und $\leq 10\%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ I (Stahl)
Volumen brutto	3,9 m ³
Volumen netto	3,5 m ³
Anzahl	297
Abfallgebindevolumen brutto	1.158,3 m ³

Tabelle 5-6 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei C-14 unspezifiziert

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	2.962
Abfallgebindevolumen brutto	2.073,4 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit/Kohlestein des AVR gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des AVR andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.3 Graphit aus dem Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB)

Wie bereits im Kapitel 4.3 beschrieben, können die knapp 1,5 Mg Graphit des FMRB in einem 400-l-Fass und in fünf 200-l-Fässern nur dann in einen Endlagerbehälter verpackt werden, wenn eine spezifizierte flüchtige Form des Graphits von $> 1\%$ und $\leq 10\%$ nachgewiesen werden kann. Kann dieser Nachweis nicht erbracht werden, so ist der Graphit des FMRB in mehrere Behälter aufzuteilen. Im Folgenden werden mögliche Verpackungen des Graphits des FMRB dargestellt.

Ist der Nachweis erbracht, dass eine spezifizierte flüchtige Form des Graphits von $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$ vorliegt, so können die sechs Fässer gemeinsam in einen Container Typ VI aus Stahl verpackt werden. Ist es nicht erwünscht, das 400-l-Fass mit den fünf 200-l-Fässern in einen Container zu verpacken, so kann das 400-l-Fass in einen Container Typ I aus Stahl und die 200-l-fässer gemeinsam in einen Container Typ II aus Stahl verpackt werden.

Ist dieser Nachweis nicht zu erbringen, muss der Graphit auf mehrere Endlagerbehälter aufgeteilt werden. Wie die C-14-Aktivität des Graphits in den sechs Fässern verteilt ist, ist nicht bekannt. Daher wird davon ausgegangen, dass die Verteilung homogen ist. Um den Grenzwert von $1,8 \text{ E}+08 \text{ Bq/Gebinde}$ einhalten zu können, müssen die $1,6 \text{ E}+09 \text{ Bq}$ auf insgesamt 9 Behälter aufgeteilt werden. Daraus ergibt sich, dass pro Behälter ca. 167 kg Graphit verpackt wird. Mit einer unterstellten Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ ergibt das pro Endlagerbehälter $0,1 \text{ m}^3$ Graphit. Als Endlagerbehälter für diese Menge an Graphit wird ein Gussbehälter Typ I angenommen.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FMRB zusammengefasst.

Tabelle 5-7 Spezifizierung des Endlagerbehälters für ein 400-l-Fass und fünf 220 l-Fässer mit Graphit des FMRB gemeinsam bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ VI (Stahl)
Volumen brutto	$5,4 \text{ m}^3$
Volumen netto	$4,9 \text{ m}^3$
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	$5,4 \text{ m}^3$

Tabelle 5-8 Spezifizierung der Endlagerbehälter ein 400-l-Fass mit Graphit des FMRB einzeln und fünf 220 l-Fässer mit Graphit des FMRB gemeinsam bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ I (Stahl)
Volumen brutto	$3,9 \text{ m}^3$
Volumen netto	$3,5 \text{ m}^3$
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	$3,9 \text{ m}^3$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ II (Stahl)
Volumen brutto	$4,6 \text{ m}^3$
Volumen netto	$4,2 \text{ m}^3$
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	$4,6 \text{ m}^3$

Tabelle 5-9 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FMRB bei C-14 unspezifiziert

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	9
Abfallgebindevolumen brutto	6,3 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit des FMRB gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des FMRB andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.4 Graphit aus dem Forschungsreaktor Frankfurt (FRF)

Wie bereits im Kapitel 4.4 beschrieben, können die 6,35 Mg Graphit des FRF in dreißig 200-l-Fässern nur dann in einen Endlagerbehälter verpackt werden, wenn eine spezifizierte flüchtige Form des C-14 von ≤ 1 % nachgewiesen werden kann. Dies ist allerdings hinfällig, da in den größten Container Typ V lediglich siebenundzwanzig 200-l-Fässer verpackt werden können, wenn dieser aus Stahl gefertigt ist. Kann der Nachweis von einer spezifizierten flüchtigen Form von ≤ 1 % nicht erfüllt werden, so könnte der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form von > 1 % und ≤ 10 % erfüllt werden. In diesem Fall muss der Graphit auch in mindestens zwei Behälter verpackt werden. Kann auch dieser Nachweis nicht erbracht werden, so ist der Graphit des FRF auf mehrere Behälter aufzuteilen. Im Folgenden werden mögliche Verpackungen des Graphits des FRF dargestellt.

Ist der Nachweis erbracht, dass eine spezifizierte flüchtige Form des Graphits von ≤ 1 % vorliegt und damit $1,8 \text{ E}+10 \text{ Bq}$ an C-14 pro Behälter enthalten sein dürfen, so müssen die 30 Fässer trotz allem in mehrere Behälter verpackt werden. Hierfür kommen Container Typ III aus Stahl in Frage. Es wird angenommen, dass pro Behälter siebzehn 200-l-Fässer gepackt werden können.

Konnte der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form des C-14 von ≤ 1 % nicht erbracht werden, dafür aber der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form des C-14 von > 1 % und ≤ 10 %, dürfen pro Behälter $1,8 \text{ E}+09 \text{ Bq}$ an C-14 beinhaltet sein und es müssen die ca. $3 \text{ E}+09 \text{ Bq}$ auf mindestens 2 Behälter verteilt werden. Auch hier kommen Container Typ III aus Stahl in Frage.

Sind diese Nachweise nicht zu erbringen, dürfen nur $1,8 \text{ E}+08 \text{ Bq}$ an C-14 pro Behälter enthalten sein und es müssen die ca. $3 \text{ E}+09 \text{ Bq}$ auf mindestens 17 Endlagerbehälter aufgeteilt werden. Da unbekannt ist, wie sich die C-14-Aktivität auf die einzelnen Fässer aufteilt, wird eine homogene Verteilung angenommen. Damit wären pro Behälter 1,76 Fässer einzulagern. Da die Fässer nicht so aufgeteilt werden können, wird in diesem Fall mit der Masse des einzulagernden Graphites gerechnet. Das Fass selber muss dann anderweitig bzw. mit in den Endlagerbehältern entsorgt werden. Insgesamt sind für den FRF 6,35 Mg an Graphit

vorzusehen. Das heißt pro Behälter sind ca. 374 kg bzw. bei einer unterstellten Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ $0,22 \text{ m}^3$ an Graphit zu verpacken. Diese Menge an Graphit kann in einen Gussbehälter Typ II verpackt werden.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FRF zusammengefasst.

Tabelle 5-10 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRF bei C-14 spezifiziert $\leq 1 \%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ III (Stahl)
Volumen brutto	$8,7 \text{ m}^3$
Volumen netto	$7,8 \text{ m}^3$
Anzahl	2
Abfallgebindevolumen brutto	$17,4 \text{ m}^3$

Tabelle 5-11 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRF bei C-14 spezifiziert $> 1\%$ und $\leq 10 \%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ III (Stahl)
Volumen brutto	$8,7 \text{ m}^3$
Volumen netto	$7,8 \text{ m}^3$
Anzahl	2
Abfallgebindevolumen brutto	$17,4 \text{ m}^3$

Tabelle 5-12 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRF bei C-14 unspezifiziert

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ II
Volumen brutto	$1,3 \text{ m}^3$
Volumen netto	$0,49 \text{ m}^3$
Anzahl	17
Abfallgebindevolumen brutto	$22,1 \text{ m}^3$

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit des FRF gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des FRF andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.5 Graphit aus den Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2 (FRG-1 und FRG-2), Jülich 1 (FRJ-1, MERLIN), Jülich 2 (FRJ-2, DIDO) und München (FRM)

Wie im Kapitel 4.5 beschrieben, ist eine Aussage darüber, ob der Graphit dieser Forschungsreaktoren die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen wird, nicht möglich. Aus diesem

Grund werden in Verpackungskonzepte gewählt, in die der Graphit aufgrund seines Volumens bzw. seiner Masse verpackt werden kann.

Sollte für diese Forschungsreaktoren das Volumen unbekannt sein, wird dieses bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ errechnet. Demnach sind für die einzelnen Reaktoren folgende Massen bzw. Volumina zu berücksichtigen:

- 11,11 Mg bzw. 5,25 m³ für den FRG-1/-2
- 12,914 Mg bzw. 7,6 m³ für den FRJ-1
- 30 Mg bzw. 17,7 m³ für den FRJ-2
- 247,08 kg bzw. 0,14 m³ für den FRM

Es ist möglich den Graphit des FRG-1/-2 in einen Container Typ IV aus Stahl zu verpacken. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FRG-1/-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-13 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRG-1/-2

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ IV (Stahl)
Volumen brutto	7,4 m ³
Volumen netto	6,5 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	7,4 m ³

Es ist möglich den Graphit des FRJ-1 in einen Container Typ V aus Stahl zu verpacken. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FRJ-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-14 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRJ-1

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ V (Stahl)
Volumen brutto	10,9 m ³
Volumen netto	9,8 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	10,9 m ³

Es ist nicht möglich den Graphit des FRJ-2 in einen Container zu verpacken. Der Graphit des FRJ-2 kann in zwei Container Typ V aus Stahlblech verpackt werden. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FRJ-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-15 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRJ-2

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ V (Stahl)
Volumen brutto	10,9 m ³
Volumen netto	9,8 m ³
Anzahl	2
Abfallgebindevolumen brutto	21,8 m ³

Der Graphit des FRM kann in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FRM zusammengefasst.

Tabelle 5-16 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRM

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	0,7 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit dieser Forschungsreaktoren gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit dieser Forschungsreaktoren andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.6 Graphit aus dem Forschungsreaktor Neuherberg (FRN)

Wie im Kapitel 4.6 beschrieben, ist eine Aussage darüber, ob der Graphit des FRN die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen wird, nicht möglich. Aus diesem Grund werden in Verpackungskonzepte gewählt, in die der Graphit des FRN aufgrund seines Volumens bzw. seiner Masse verpackt werden kann. Eine zusätzliche Konditionierung des Graphits mittels eines Fixierungsmittels wird nicht berücksichtigt.

Die Menge des Graphits des FRN ist mit 27,7 Mg bzw. 15,4 m³ zu hoch, um ihn in einen Endlagerbehälter verpacken zu können. Der Graphit des FRN kann in zwei Container Typ III aus Stahlblech verpackt werden.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des FRN zusammengefasst.

Tabelle 5-17 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphit des FRN

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ III (Stahl)
Volumen brutto	8,7 m ³
Volumen netto	7,8 m ³
Anzahl	2
Abfallgebindevolumen brutto	17,4 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit des FRN gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des FRN andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.7 Graphit aus dem Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) und dem Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR)

Wie im Kapitel 4.7 beschrieben, erfüllen die Graphitblöcke VKTA0004802 bis VKTA0004806 die Endlagerungsbedingungen Konrad und können gemeinsam in einen Endlagerbehälter verpackt werden. Diese haben insgesamt eine Masse von 2,967 Mg und damit bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 1,75 m³. Als Endlagerbehälter für diese Graphitblöcke kommt ein Container Typ I aus Stahlblech in Frage.

Der Graphitblock VTKA0003418 erfüllt ebenfalls die Endlagerungsbedingungen Konrad. Er kann in einem Stück in einen Endlagerbehälter gepackt werden, wenn eine spezifizierte flüchtige Form des C-14 von > 1 % und ≤ 10 % nachgewiesen werden kann. In diesem Fall können die 96 kg bzw. 0,06 m³ in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden.

Ist dieser Nachweis nicht zu erbringen, muss der Graphit auf mehrere Endlagerbehälter aufgeteilt werden. Wie die C-14-Aktivität des Graphits in den sechs Fässern verteilt ist, ist nicht bekannt. Daher wird davon ausgegangen, dass die Verteilung homogen ist. Um den Grenzwert von 1,8 E+08 Bq/Gebinde einhalten zu können, müssen die 9,21 E+08 Bq auf insgesamt 6 Behälter aufgeteilt werden. Daraus ergibt sich, dass pro Behälter ca. 16 kg Graphit verpackt wird. Mit einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ergibt das pro Endlagerbehälter ca. 0,01 m³ Graphit. Als Endlagerbehälter für diese Menge an Graphit wird ein Gussbehälter Typ I angenommen.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des RFR zusammengefasst.

Tabelle 5-18 Spezifizierung des Endlagerbehälters für die Graphitblöcke VKTA0004802 bis VKTA0004806

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ I (Stahl)
Volumen brutto	3,9 m ³
Volumen netto	3,5 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	3,9 m ³

Tabelle 5-19 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphitblock VKTA0003418 bei C-14 spezifiziert > 1 % und ≤ 10 %

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	0,7 m ³

Tabelle 5-20 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphitblock VKTA0003418 bei C-14 unspezifiziert

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	6
Abfallgebindevolumen brutto	4,2 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit des RFR gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des RFR andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.8 Graphit aus dem Thorium-Hochtemperaturreaktor Hamm-Uentrop (THTR 300)

Wie im Kapitel 4.8 beschrieben, ist eine Aussage darüber, ob der Graphit des THTR 300 und der Graphit- und Absorberelemente die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen wird, nicht möglich. Aus diesem Grund werden Verpackungskonzepte gewählt, in die der Graphit des THTR und der Graphit- und Absorberelemente aufgrund seines Volumens bzw. seiner Masse verpackt werden kann, unter Berücksichtigung des Nachweises der spezifizierten Flüchtigkeit des C-14. Da nicht bekannt ist, wie sich die Aktivität des Graphits des THTR 300 und des Graphits der Graphit- und Absorberelemente verteilt, wird bei beiden von einer homogenen Verteilung der Aktivität ausgegangen.

Ist der Nachweis erbracht, dass eine spezifizierte flüchtige Form des C-14 von ≤ 1 % vorliegt, dürfen 1,8 E+10 Bq an C-14 pro Behälter enthalten sein und es müssen die 5,0 E+12

Bq auf mindestens 278 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 551,123 Mg Graphit eine Graphitmenge von ca. 2,0 Mg pro Behälter. Diese 2,0 Mg haben bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 1,18 m³. Dieses Volumen kann in einen Konrad Container Typ I aus Stahl verpackt werden. Ist dieser Nachweis für die Graphit- und Absorberelemente erbracht, so müssen diese 5,78 E+11 Bq auf mindestens 33 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 63,021 Mg eine Graphitmenge von ca. 1,9 Mg. Diese 1,9 Mg haben bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 1,12 m³. Dieses Volumen kann in einen Container Typ I aus Stahl verpackt werden.

Konnte der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form des C-14 von $\leq 1 \%$ nicht erbracht werden, dafür aber der Nachweis einer spezifizierten flüchtigen Form des C-14 von $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$, dürfen 1,8 E+09 Bq an C-14 pro Behälter beinhaltet sein und es müssen die 5,0 E+12 Bq auf mindestens 2.778 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 551,123 Mg Graphit eine Graphitmenge von ca. 200 kg pro Behälter. Diese 200 kg haben bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 0,12 m³. Dieses Volumen kann in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden. Ist dieser Nachweis für die Graphit- und Absorberelemente erbracht, so müssen diese 5,78 E+11 Bq auf mindestens 322 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 63,021 Mg eine Graphitmenge von ca. 200 kg. Diese 200 kg haben bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 0,18 m³. Dieses Volumen kann in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden.

Sind diese Nachweise nicht zu erbringen, dürfen pro Behälter maximal 1,8 E+08 Bq an C-14 enthalten sein und es müssen die 5,00 E+12 Bq auf mindestens 27.778 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 551,123 Mg Graphit eine Graphitmenge von ca. 20 kg pro Behälter. Diese 20 kg haben bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 0,01 m³. Dieses Volumen kann in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden. Ist dieser Nachweis für die Graphit- und Absorberelemente erbracht, so müssen diese 5,78 E+11 Bq auf mindestens 3.212 Behälter aufgeteilt werden. Damit sind das bei 63,021 Mg eine Graphitmenge von ca. 20 kg. Diese 200 kg haben bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ein Volumen von 0,01 m³. Dieses Volumen kann in einen Gussbehälter Typ I verpackt werden.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits des THTR 300 zusammengefasst.

Tabelle 5-21 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des THTR 300 bei C-14 spezifiziert $\leq 1 \%$

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ I (Stahl)
Volumen brutto	3,9 m ³
Volumen netto	3,5 m ³
Anzahl	278
Abfallgebindevolumen brutto	1.084,2 m ³

Tabelle 5-22 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des THTR 300 bei C-14 spezifiziert > 1% und ≤ 10 %

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	2.778
Abfallgebindevolumen brutto	1.944,6 m ³

Tabelle 5-23 Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des THTR 300 bei C-14 unspezifiziert

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	27.778
Abfallgebindevolumen brutto	19.444,6m ³

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten zur Verpackung der Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 zusammengefasst.

Tabelle 5-24 Spezifizierung der Endlagerbehälter für die Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 bei C-14 spezifiziert ≤ 1 %

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ I (Stahl)
Volumen brutto	3,9 m ³
Volumen netto	3,5 m ³
Anzahl	33
Abfallgebindevolumen brutto	128,7 m ³

Tabelle 5-25 Spezifizierung der Endlagerbehälter für die Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 bei C-14 spezifiziert > 1% und ≤ 10 %

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	322
Abfallgebindevolumen brutto	225,4 m ³

Tabelle 5-26 Spezifizierung der Endlagerbehälter für die Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 bei C-14 unspezifiziert

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Gussbehälter Typ I
Volumen brutto	0,7 m ³
Volumen netto	0,2 m ³
Anzahl	3.212
Abfallgebindevolumen brutto	2.248,4 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit des THTR 300 und die Graphit- und Absorberelemente gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit des THTR 300 und der Graphit- und Absorberelemente andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern.

5.9 Graphit aus weiteren Forschungsreaktoren

Wie im Kapitel 4.9 beschrieben, ist eine Aussage darüber, ob der Graphit der weiteren Reaktoren die Endlagerungsbedingungen Konrad erfüllen wird, nicht möglich. Des Weiteren sind die genauen Graphitmassen einiger Reaktoren unbekannt. Aus diesem Grund wird dieser Graphit nicht für die einzelnen Reaktoren aufgeteilt, sondern insgesamt betrachtet. Es werden Verpackungskonzepte gewählt, in die der Graphit der weiteren Reaktoren aufgrund seines Volumens bzw. seiner Masse verpackt werden kann.

Die Menge des Graphits des beträgt 13 Mg. Bei einer unterstellten Dichte von 1,7 g/cm³ ergibt das ein Volumen von 7,6 m³. Der Graphit der weiteren Reaktoren kann damit in einen Container Typ V aus Stahlblech verpackt werden.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten zur Verpackung des Graphits der weiteren Reaktoren zusammengefasst.

Tabelle 5-27 Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphit der weiteren Reaktoren

Parameter	Spezifikation
Endlagerbehälter-Typ	Container Typ IV (Stahl)
Volumen brutto	10,9 m ³
Volumen netto	9,8 m ³
Anzahl	1
Abfallgebindevolumen brutto	10,9 m ³

Da es bislang keine konkreten Angaben zu den Endlagerbehältern für den Graphit der weiteren Reaktoren gibt, ist die hier aufgeführte Auswahl der Endlagerbehälter als vorläufig anzusehen. Es ist möglich, dass in der Zukunft für den Graphit der weiteren Reaktoren andere Endlagerbehälter ausgewählt werden. Dadurch kann sich das Bruttoabfallgebindevolumen verändern

5.10 Weitere C-14-haltige radioaktive Abfälle

Neben dem Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren sind auch Verdampferkonzentrate, Ionenaustauscherharze und die Kerneinbauten sowie der Reaktordruckbehälter (RDB)-Grundkörper aus den Kernkraftwerken als C-14-haltiger Abfall zu entsorgen.

Verdampferkonzentrate sind getrocknete Rückstände aus der Abwasseraufbereitung. Sie bestehen aus Sumpfwasser aus den Anlagenräumen, Laborabwässern, Dekontwässern, Wasser aus dem Brennelement-Becken, Sumpfwasser aus den Betriebsräumen, Wäschereiabwässer, Dusch- und Waschwässer, Destillat aus der Kühlmittelaufbereitung und Dekontflüssigkeiten. Leider sind derzeit keine Angaben zu den Massen, Volumina und Aktivitäten der Verdampferkonzentrate bekannt.

Ionenaustauscherharze werden zur Reinigung von Wässern eingesetzt. In Druckwasserreaktoren werden vorwiegend Kugelharze eingesetzt. Sie dienen zur Regeneration von Dekontlösungen, der Entfernung von kolloidalen und ionalen Verunreinigungen, der Entfernung von Spalt- und Aktivierungsprodukten und der Regelung der Bor- und Li-7-Konzentration im Primärkühlmittel. In Siedewasserreaktoren werden vorwiegend Pulverharze eingesetzt. Sie dienen zur Reinigung von Kühlmittel, Kondensat, Brennelementbeckenwasser und Abwasser. Auch für die Ionenaustauscherharze liegen derzeit keine Angaben zu Massen, Volumina und Aktivitäten vor.

Die Kerneinbauten und der Reaktordruckbehälter (RDB) besitzen eine z.T. sehr hohe Aktivität der Radionuklide durch die Aktivierung der Werkstoffe während der Betriebszeit des Reaktors. Die Kontamination der Kerneinbauten und des RDB ist vernachlässigbar gering. Die Werkstoffzusammensetzung ist gut dokumentiert. Bei den Werkstoffen handelt es sich u.a. um Austenit, Zircaloy und Inconel. In dem Stahl der Kerneinbauten und des RDBs ist Stickstoff enthalten, der mittels Neutroneneinfang zu C-14 aktiviert wird. Der Stickstoff ist ein Begleitelement, das aufgrund des Herstellungsprozesses in die Schmelze gelangt /Niedersträßer 2002/. Der prozentuale Stickstoffanteil im Werkstoff der Kerneinbauten und des RDB-Grundkörpers ist nicht bekannt.

In der Tabelle 5-28 sind die C-14-Aktivitäten von einigen Kernbauteilen und dem RDB-Grundkörper dargestellt. Es wurde dabei ein Anteil von Stickstoff von 0,11 % angenommen /ZWT 2012/.

Tabelle 5-28 C-14-Aktivitäten von einigen Kerneinbauten und dem RDB-Grundkörper

Bauteil	Masse [Mg]	Spez. C-14-Aktivität [Bq/g]	C-14-Aktivität [Bq]
Kernumfassung	8,1	7,7 E+06	6,3 E+13
Kernbehälter	33,8	2,7 E+05	9,1 E+12
Gitterplatte	1,4	4,2 E+06	5,9 E+12
Unterer Rost	11,6	2,9 E+05	3,3 E+12
RDB-Grundkörper	89	4,2 E+02	1,6 E+10

In Summe sind das $8,1 \text{ E}+13 \text{ Bq}$ an C-14 für die Kerneinbauten und den RDB eines Druckwasserreaktors. Das sind für einen Reaktor etwas über 20 % der maximal im Endlager Konrad einlagerbaren Aktivität an C-14.

In Deutschland sind zurzeit 7 Druckwasserreaktoren im Betrieb und 7 Stück befinden sich im Stillstand bzw. in der Stilllegung. Darüber hinaus sind 2 Siedewasserreaktoren im Betrieb und 6 Stück befinden sich im Stillstand bzw. in der Stilllegung. Unterstellt man für einen Siedewasserreaktor dieselben Aktivitätswerte für C-14 wie für die Kerneinbauten und den RDB eines Druckwasserreaktors so sind das insgesamt $1,8 \text{ E}+15 \text{ Bq}$ an C-14 für alle in Deutschland existierenden Druckwasser- und Siedewasserreaktoren. Dies überschreitet die maximal in das Endlager Konrad einlagerbare C-14-Aktivität um das 4,5-fache. Nach diesen Werten ist nur ein Bruchteil der Kerneinbauten und des RDB-Grundkörpers im Endlager Konrad einlagerbar. Da der Stickstoff-Anteil ein angenommener Wert ist, kann sich dieser noch verändern. Damit kann die C-14-Aktivität der Kerneinbauten und des RDB-Grundkörpers sowohl höher als auch niedriger sein. Wenn sie niedriger ist, könnte ein größerer Anteil dieses radioaktiven Abfalls im Endlager Konrad eingelagert werden.

Wie man anhand der Werte für die Aktivitäten sehen kann, sind die Kerneinbauten und der RDB-Grundkörper der DWR und SWR nicht komplett im Endlager Konrad einlagerbar. Dazu kommt noch der Graphit/Kohlestein aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren sowie weiterer C-14 haltiger Abfall, wie die Verdampferkonzentrate und die Ionenaustauscherharze. Hier stellt sich nun die Frage, welcher Abfall wird in das Endlager Konrad eingelagert und welcher muss in einem anderen Endlager entsorgt werden. Hierfür gibt es unterschiedliche Ansätze, die im Folgenden aufgezählt werden:

- Die Abfallarten werden gemäß ihrer Toxizität (radiologisch und stofflich) bewertet und demnach in das Endlager Konrad eingelagert oder sind für ein anderes Endlager vorzusehen
- Die Öffentliche Hand und Energieversorgungsunternehmen (EVUs) bekommen jeweils den Anteil der maximalen C-14-Aktivität für den Anteil der Kosten des Endlagers den sie tragen.
- Die Öffentliche Hand und die EVUs bekommen jeweils den Anteil der maximalen C-14-Aktivität für den prozentualen Anteil an Abfällen, den sie ins Endlager einlagern werden.

Eine Bewertung der ersten Möglichkeit ist derzeit nicht möglich. Weder für den Graphit/Kohlestein noch für die weiteren C-14 haltigen Abfallarten ist eine ausreichende Datenbasis für die Bewertung der radiologischen und stofflichen Toxizität vorhanden. Aus diesem Grund wird für diese Möglichkeit hier keine Aussage gemacht, ob der Graphit aus dem THTR 300 und den Forschungsreaktoren sowie den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR in das Endlager Konrad eingelagert werden könnte.

Bei der zweiten Möglichkeit teilt sich der Anteil der maximal einlagerbaren C-14-Aktivität auf 2/3 für die EVUs und 1/3 für die Öffentliche Hand auf /BfS2014a/. Der Betreiber des THTR 300 gehört zu den Energieversorgungsunternehmen. Damit muss der Graphit des

THTR 300 bei den 2/3 der EVUs berücksichtigt werden und der Graphit der Forschungsreaktoren sowie der im Porenleichtbeton eingeschlossene Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei den 1/3 der Öffentlichen Hand.

1/3 der maximal einlagerbaren C-14-Aktivität beträgt $1,33 \text{ E}+14 \text{ Bq}$ bzw. 101.000 m^3 insgesamt für alle Abfälle der Öffentlichen Hand. Die Gesamt-C-14-Aktivität des Graphits/Kohlesteins der Öffentlichen Hand ist nicht bekannt, da nicht für alle Reaktoren die Aktivitäten bekannt sind. Daher kann keine Aussage darüber gemacht werden, welchen prozentuellen Anteil die C-14-Aktivität des Graphits/Kohlesteins ausmacht. Insgesamt ist ein maximales Gesamtabfallbruttovolumen bei einer unspezifizierten flüchtigen Form des C-14 von ca. 648 m^3 an Graphit/Kohlestein für die Öffentliche Hand zu berücksichtigen. Dies sind $0,64 \%$ der 101.000 m^3 , die bei dieser Variante der Öffentlichen Hand zustehen. Es kann allerdings keine Aussage darüber gemacht werden, ob die 648 m^3 in das Endlager Konrad eingelagert werden, da die Aktivitäten unbekannt sind und unbekannt ist, wie die Öffentliche Hand ihre zustehenden Aktivitäten und Volumina auf die einzelnen bei ihr anfallenden Abfallarten aufteilt.

2/3 der maximal einlagerbaren C-14-Aktivität beträgt $2,67 \text{ E}+14 \text{ Bq}$ bzw. 202.000 m^3 für alle Abfälle der EVUs. Die Gesamt-C-14-Aktivität des Graphits aus dem THTR 300 und den Graphit- und Absorberelementen beträgt $5,58 \text{ E}+12 \text{ Bq}$. Dies sind ca. $2,1 \%$ der für die EVUs maximal einlagerbaren C-14-Aktivität. Insgesamt ist ein maximales Gesamtabfallbruttovolumen bei einer unspezifizierten flüchtigen Form des C-14 von ca. 21.693 m^3 an Graphit und Graphit- und Absorberelemente für den THTR 300 zu berücksichtigen. Dies sind ca. $10,7 \%$ der 202.000 m^3 , die bei dieser Variante den EVUs zustehen. Inwieweit die EVUs diese Aktivität bzw. das Volumen untereinander aufteilen würden, ist unbekannt. Aus diesem Grund kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob der Graphit des THTR 300 in das Endlager eingelagert werden könnte oder nicht.

Bei der dritten Möglichkeit teilt sich der Anteil der maximal einlagerbaren C-14-Aktivität auf 61% für die EVUs und 39% für die Öffentliche Hand auf /BfS2014b/. Damit muss der Graphit des THTR 300 bei den 61% der EVUs berücksichtigt werden und der Graphit der Forschungsreaktoren sowie der im Porenleichtbeton eingeschlossene Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei den 39% der Öffentlichen Hand.

39% der maximal einlagerbaren C-14-Aktivität betragen $1,56 \text{ E}+14 \text{ Bq}$ bzw. 118.170 m^3 insgesamt für alle Abfälle der Öffentlichen Hand. Die Gesamt-C-14-Aktivität des Graphits/Kohlesteins der Öffentlichen Hand ist nicht bekannt, da nicht für alle Reaktoren die Aktivitäten bekannt sind. Daher kann keine Aussage darüber gemacht werden, welchen prozentuellen Anteil die C-14-Aktivität des Graphits/Kohlesteins ausmacht. Insgesamt ist ein maximales Gesamtabfallbruttovolumen bei einer unspezifizierten flüchtigen Form des C-14 von ca. 648 m^3 an Graphit/Kohlestein für die Öffentliche Hand zu berücksichtigen. Dies sind $0,55 \%$ der 118.170 m^3 , die bei dieser Variante der Öffentlichen Hand zustehen. Es kann allerdings keine Aussage darüber gemacht werden ob die 648 m^3 in das Endlager Konrad eingelagert werden, da die Aktivitäten unbekannt sind und unbekannt ist, wie die Öffentliche Hand ihre zustehenden Aktivitäten und Volumina auf die einzelnen bei ihr anfallenden Abfallarten aufteilt.

61 % der maximal einlagerbaren C-14-Aktivität betragen $2,44 \text{ E}+14 \text{ Bq}$ bzw. 184.830 m^3 für alle Abfälle der EVUs. Die Gesamt-C-14-Aktivität des Graphits aus dem THTR 300 und den Graphit- und Absorberelementen beträgt $5,58 \text{ E}+12 \text{ Bq}$. Dies sind ca. 2,3 % der für die EVUs maximal einlagerbaren C-14-Aktivität. Insgesamt ist ein maximales Gesamtabfallbruttovolumen bei einer unspezifizierten flüchtigen Form des C-14 von ca. 21.693 m^3 an Graphit und Graphit- und Absorberelementen für den THTR 300 zu berücksichtigen. Dies sind ca. 11,7 % der 184.830 m^3 , die bei dieser Variante den EVUs zu stehen. Inwieweit die EVUs diese Aktivität bzw. das Volumen untereinander aufteilen würden, ist unbekannt. Aus diesem Grund kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob der Graphit des THTR 300 in das Endlager eingelagert werden könnte oder nicht.

Es ist derzeit nicht möglich, eine Aussage darüber zu treffen, ob der Graphit aus dem THTR 300 und den Forschungsreaktoren sowie der im Porenleichtbeton eingebundene Graphitstaub und der Kernbrennstoff aus dem AVR in das Endlager Konrad eingelagert werden kann, selbst wenn sie die Anforderungsbedingungen für das Endlager Konrad erfüllen. Um eine solche Aussage treffen zu können ist es notwendig, von den EVUs und der Öffentlichen Hand zu erfahren, wie sie das für sie vorgesehene Abfallvolumen bzw. die Aktivitäten auf die von ihnen endzulagernden Abfälle aufteilt. Des Weiteren ist für alle C-14 haltige Abfälle noch zu zeigen, in welcher flüchtigen Form das C-14 vorliegt. Dies kann die endzulagernde Menge des Graphits im Endlager Konrad zum Teil drastisch erhöhen bzw. senken.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1	Mengengerüst des in Deutschland zu entsorgenden Graphits/Kohlesteins aus den Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren	2
Tabelle 1-2	Vorschlag für Endlagerbehältertyp und Anzahl der Endlagerbehälter für den Graphit/Kohlestein aus deutschen Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren mit Angaben zu Gesamtvolumina	5
Tabelle 2-1	Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren in denen Graphit/Kohlestein zum Einsatz kam	11
Tabelle 2-2	Aktivitätsinventar des Graphits bzw. Kohlesteins aus dem AVR	13
Tabelle 2-3	Bestandteile und Aktivitäten des verfüllten AVR Reaktorbehälter mit Stand 2009	15
Tabelle 2-4	Graphitmengen in den Forschungsreaktoren Geesthacht 1 und 2	17
Tabelle 2-5	Aktivitätsinventar des Graphits bzw. Kohlesteins aus dem FRN	19
Tabelle 2-6	Graphitmengen im VKTA	21
Tabelle 2-7	Graphitmengen der Deckensteine des THTR 300	23
Tabelle 2-8	Graphitmengen der Wandsteine des THTR 300	23
Tabelle 2-9	Graphitmengen der Bodensteine des THTR 300	24
Tabelle 2-10	Graphit des THTR in den unterschiedlichen Qualitäten	24
Tabelle 2-11	Graphitmassen der weiteren Forschungsreaktoren	25
Tabelle 3-1	Grundlegende Radionuklidwerte für einzelne Radionuklide gemäß der ADR/RID (Auszug)	30
Tabelle 3-2	Abmessungen der für das Endlager Konrad zugelassenen Behältertypen	40
Tabelle 3-3	Garantiewerte für Radionuklide und Radionuklidgruppen pro Abfallgebinde, die aus der Sicherheitsanalyse für den bestimmungsgemäßen Betrieb resultieren	43
Tabelle 3-4	Aktivitätsgrenzwerte für Leitnuklide, weitere Nuklide und nicht spezifizierte sonstige α - und β/γ -Strahler, die aus der Störfallanalyse resultieren	44
Tabelle 3-5	Aktivitätsgrenzwerte für Leitnuklide, weitere Nuklide und nicht spezifizierte sonstige α - und β/γ -Strahler, die aus der Analyse zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins resultieren	46
Tabelle 3-6	Aktivitätswerte bzw. Massen spaltbarer Stoffe außer Natururan und abgereichertem Uran, die aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit resultieren	50
Tabelle 3-7	Zulässige Aktivitäten bzw. Massen von höheren spaltbaren Aktiniden,	

	die sich aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit ergeben. Angabe in Bq bzw. g pro Abfallgebinde	51
Tabelle 3-8	Maximal einlagerbare Aktivitäten relevanter Radionuklide und Radionuklidgruppen am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad	52
Tabelle 3-9	Mittlere Aktivitätskonzentration relevanter Radionuklide und Radionuklidgruppen am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad	52
Tabelle 5-1	Spezifizierung des Endlagerbehälters für die Graphitblöcke des AKR-2 einzeln	66
Tabelle 5-2	Spezifizierung des Endlagerbehälters für die Graphitblöcke des AKR-2 zusammen	67
Tabelle 5-3	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphit/Kohlestein des AVR	68
Tabelle 5-4	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei C-14 spezifiziert $\leq 1 \%$	69
Tabelle 5-5	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$	69
Tabelle 5-6	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den im Porenleichtbeton eingebundenen Graphitstaub und Kernbrennstoff des AVR bei C-14 unspezifiziert	69
Tabelle 5-7	Spezifizierung des Endlagerbehälters für das eine 400-l-Fass und die fünf 220 l-Fässer mit Graphit des FMRB gemeinsam bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$	70
Tabelle 5-8	Spezifizierung der Endlagerbehälter für das eine 400-l-Fass mit Graphit des FMRB einzeln und die fünf 220 l-Fässer mit Graphit des FMRB gemeinsam bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$	70
Tabelle 5-9	Spezifizierung der Endlagerbehälter den Graphit des FMRB bei C-14 unspezifiziert	71
Tabelle 5-10	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRF bei C-14 spezifiziert $< 1 \%$	72
Tabelle 5-11	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRF bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $< 10 \%$	72
Tabelle 5-12	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRF bei C-14 unspezifiziert	72
Tabelle 5-13	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRG-1/-2	73
Tabelle 5-14	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRJ-1	73

Tabelle 5-15	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRJ-2	74
Tabelle 5-16	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des FRM	74
Tabelle 5-17	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphit des FRN	75
Tabelle 5-18	Spezifizierung des Endlagerbehälters für die Graphitblöcke VKTA0004802 bis VKTA0004806	76
Tabelle 5-19	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphitblock VKTA0003418 bei C-14 spezifiziert $> 1 \%$ und $\leq 10 \%$	76
Tabelle 5-20	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphitblock VKTA0003418 bei C-14 unspezifiziert	76
Tabelle 5-21	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des THTR 300 bei C-14 spezifiziert $\leq 1 \%$	77
Tabelle 5-22	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des THTR 300 bei C-14 spezifiziert $> 1\%$ und $\leq 10 \%$	78
Tabelle 5-23	Spezifizierung der Endlagerbehälter für den Graphit des THTR 300 bei C-14 unspezifiziert	78
Tabelle 5-24	Spezifizierung der Endlagerbehälter für die Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 bei C-14 spezifiziert $\leq 1 \%$	78
Tabelle 5-25	Spezifizierung der Endlagerbehälter für die Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 bei C-14 spezifiziert $> 1\%$ und $\leq 10 \%$	78
Tabelle 5-26	Spezifizierung der Endlagerbehälter für die Graphit- und Absorberelemente des THTR 300 bei C-14 unspezifiziert	79
Tabelle 5-27	Spezifizierung des Endlagerbehälters für den Graphit der weiteren Reaktoren	79
Tabelle 5-28	C-14-Aktivitäten von einigen Kerneinbauten und dem RDB-Grundkörper	80

Abkürzungsverzeichnis

ABK	Abfallbehälterklasse
ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route – Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
Ag	Silber
AKR	Ausbildungskernreaktor
Am	Americium
AMR	Abbrandmessreaktor
APG	Abfallproduktgruppe
Ar	Argon
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
Ba	Barium
Be	Beryllium
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Bq	Becquerel
C	Kohlenstoff
Ca	Kalzium
Cd	Cadmium
Cf	Californium
Cl	Chlor
Cm	Curium
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratzentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
Co	Kobalt
Cs	Cäsium
D ₂ O	Deuteriumoxid, schweres Wasser
d. VO v.	der Verordnung vom
DWR	Druckwasserreaktor
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
Eu	Europium
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EWN	Energiewerke Nord
Fe	Eisen
FRMB	Forschungs- und Messreaktor Braunschweig
FRG-1	Forschungsreaktor Geesthacht 1
FRH	Forschungsreaktor Hannover
FRJ-1	Forschungsreaktor Jülich 1 (MERLIN)
FRJ-2	Forschungsreaktor Jülich 2 (DIDO)
FRM	Forschungsreaktor München
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz

FRN	Forschungsreaktor Neuherberg
g	Gramm
GGVSEB	Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt
H	Wasserstoff
H-3 / T	Tritium
Ho	Holmium
I	Jod
IAEA	International Atomic Energy Agency
ILW	Intermediate Level Waste, Mittelradioaktiver Abfall
i. S. d.	im Sinne des
K	Kelvin
Kr	Krypton
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KRW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
kg	Kilogramm
l	Liter
LHE	Landessammelstelle Hessen
LSA	Low specific activity, geringe spezifische Aktivität
m	Meter
m ³	Kubikmeter
Mg	Megagramm
mm ²	Quadratmillimeter
Mo	Molybdän
mSv/h	Mikro-Sievert pro Stunde
n	Neutron
N	Newton
Na	Natrium
Nb	Niob
NDA	Nuclear Decommissioning Authority
Nds. GVBl	Niedersächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt
Ni	Nickel
NMU	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz
Np	Neptunium
NWG	Niedersächsisches Wassergesetz
P	Phosphor
Pa	Pascal
Pa	Paladium
Pm	Promethium
Pu	Plutonium
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
Ra	Radium
RAKE	Rossendorfer Anordnung für kritische Experimente
RB	Reaktorbehälter
Rb	Rubidium
RDB	Reaktordruckbehälter

RID	Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses – Regelung zur internationalen Beförderung gefährlicher Güter im Schienenverkehr
RFR	Rossendorfer Forschungsreaktor
RRR	Ringzonenreaktor
s	Sekunde
SAR	Siemens Argonaut Reaktor
Sb	Antimon
SCO	Surface contaminated objects, Oberflächenkontaminierte Objekte
Se	Selen
Sm	Samarium
Sn	Zinn
SNEAK	Schnelle Nullenergie-Anordnung Karlsruhe
Sr	Strontium
StrlSchV	Strahlenschutz Verordnung
SUR	Siemens Unterrichtsreaktor
Tc	Technetium
Te	Tellur
TRIGA	Training, Research, Isotopes, General Atomic
Th	Thorium
THTR 300	Thorium-Hochtemperaturreaktor Hamm-Uentrop
Tl	Thallium
U	Uran
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
W	Watt
Y	Yttrium
Zr	Zirkonium
ZustVo-Umwelt-Arbeitsschutz	Verordnung über Zuständigkeiten auf den Gebieten des Arbeitsschutz-, Immissionsschutz-, Sprengstoff-, Gentechnik- und Strahlenschutzrechts sowie in anderen Rechtsgebieten
°C	Grad Celsius
%	Prozent
α	Alpha
β/γ	Beta/Gamma

Literaturverzeichnis

ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route – Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, Stand 03. Juni 2013
AtG 2013	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), Stand 28. August 2013
AVR 2009	Bisplinghoff, B. Dr., Rahenbrock, A., Wahlen, E., Die Verfüllung des AVR-Reaktorbehälters – Technische und logistische Ausführung, KONTEC 2009
AVR 2013	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH, Forschungsvorhaben CarbonForeSt – Aktuelle Bestandsaufnahme der Massen, Volumina und Gesamtaktivität des in Deutschland zu entsorgenden Graphits bzw. Kohlesteins, Schreiben vom 16.09.2013, Zeichen E-21962
BfS 1997a	Bundesamt für Strahlenschutz, EU 117 Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle – Schachtanlage Konrad, Stand 25.02.1997, Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002
BfS 1997b	Bundesamt für Strahlenschutz, EU 240 Produktkontrolle radioaktiver Abfälle – Schachtanlage Konrad, Stand 18.02.1997, Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002
BfS 2010a	Bundesamt für Strahlenschutz, Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand Oktober 2010) - Schachtanlage Konrad
BfS 2010b	Bundesamt für Strahlenschutz, Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, radiologische Aspekte (Stand Oktober 2010) - Schachtanlage Konrad
BfS 2010c	Bundesamt für Strahlenschutz, Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, stoffliche Aspekte (Stand Oktober 2010) - Schachtanlage Konrad
BfS 2014a	Bundesamt für Strahlenschutz, http://www.endlager-konrad.de/nn_1914/DE/2__Umbau/Kosten/__node.html?__nnn=true Stand März 2014, zuletzt abgerufen am 12.09.2014
BfS 2014b	Bundesamt für Strahlenschutz, http://www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/prognose.html , Stand 07.04.2014, zuletzt abgerufen am 12.09.2014
BMU 2010	Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle
Bach 2004	Bach, Fr.-W., Wilk, P. Dr., Trennen von graphitischen Reaktorbauteilen, Abschlussbericht, BMBF FKZ 02 S 7849, 2004

DBETEC 2011	DBE TECHNOLOGY GmbH, Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/ Lagerung (LABRADOR), Dezember 2011
EWN 2011	Energiewerke Nord, Brief an das BfS, Datenerhebung über nicht konradgängige Abfälle als Basis für die vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG), 10.06.2011
FKHiel 2013	Fachhochschule Kiel, Forschungsvorhaben CarbonForeSt, E-Mail vom 20.09.2013
FRJ 2010	Berichte des FZJ, 4332, Florjan, M. W., Dekontamination von Nukleargraphit durch thermische Behandlung, Dissertation, April 2010
FZJ 2010	Forschungszentrum Jülich, Sicherheitsbericht, Stilllegung und Abbau der Reaktoranlage FRJ-2 und ihre Hilfs- und Nebenanlagen, Rev.3, Juli 2010
FZJ 2014a	Forschungszentrum Jülich, Graphit in DE, E-Mail vom 30.09.2014
FZJ 2014b	Forschungszentrum Jülich, http://www.fz-juelich.de/gn/DE/Leistungen/NukleareProjekte/VorhabenProjekte/FRJ-2/Forschungsreaktor_DIDO.html , zuletzt abgerufen am 1. Oktober 2014
GGVSEB 2013	Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt - GGVSEB), Stand 22. Januar 2013
HKG 2013	Hochtemperatur-Kernreaktor GmbH, THTR Graphit Massen, e-Mail vom 26.09.2013
HLUG 2014	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radioaktive Graphitabfälle für die Endlagerung – Ihre Anfrage vom 28.07.2014 – TEC-FE/SDö, Schreiben vom 25.08.2014
HMUKLV 2015	Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Radioaktive Graphitabfälle für die Endlagerung, Schreiben vom 31. März 2015
HZG 2014	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, FuE-Vorhaben CarbonForeSt – Ihr Schreiben vom 28.07.2014 – Bestandsaufnahme zu entsorgenden Graphits, Schreiben vom 10. September 2014
HZM 2014	Helmholtz-Zentrum München, FuE – Vorhaben CarbonForeSt, aktuelle Bestandsaufnahme des zu Entsorgenden Graphits – Ihr Zeichen TEC-FE/SDö, Schreiben vom 25.08.2014
IAEA 2009	IAEA Safety Standards, Safety Requirements No. TS-R-1, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2009
JK 2006	Jahrestagung Kerntechnik 2006, Jünger-Gräf, B., Moser, T., Berthold, M., Übersicht und Erfahrungen beim Rückbau des Forschungsreaktor TRIGA HD II aus Sicht des Genehmigungsinhabers
JK 2007	Jahrestagung Kerntechnik 2007, Pohl, H., Issing, J., Harke, H., c/o Babcock Noell GmbH, „Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des TRIGA-Mark-I Reaktors der Medizinischen Hochschule Hannover

KrWAbfG 1994	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG), Stand 27.09.1994
KrWG 2013	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), Stand 22.05.2013
NDA 2013	Nuclear Decommissioning Authority (NDA), Options for Packaging of Reactor Core Graphite for Disposal, RWM Reports, 15. January 2013
NDA 2014	Nuclear Decommissioning Authority (NDA), Higher Activity Waste - Strategic Position Paper on the Management of Waste Graphite, January 2014
Niederstraßer 2002	Niederstraßer, J., Stählen unter Berücksichtigung der Einzelfunkenspektrometrie, Dissertation, Duisburg, 2002
NMU 2002	Niedersächsisches Umweltministerium, Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, 22. Mai 2002, Az.: 41-40326/3/10, Hannover
PTB 2013	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Graphitbestand zur Endlagerung, E-Mail vom 8.11.2013
RID 2013	Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses – Regelung zur internationalen Beförderung gefährlicher Güter im Schienenverkehr), Stand 03. Juni 2013
StrlSchV 2012	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), Stand 24. Februar 2012
TUDresden 2013	Technische Universität Dresden, Forschungsvorhaben CarbonForeSt- hier: Bestandsaufnahme Reaktorgraphit aus Ausbildungskernreaktor AKR-2, Schreiben vom 5.09.2013
VKTA 2014	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V. Forschungsvorhaben CarbonForeSt hier: Übergabe der Graphitdaten des VKTA, Schreiben vom 28.07.2014
ZWT 2012	Zentrum für Weiterbildung und Technologietransfer, Kurs zur Endlagerung radioaktiver Abfälle – Grundlagen, Produktkontrolle, Dokumentation. Hannover, November 2012

Anhang**Stoffe mit geringer spezifischer Aktivität (LSA)**

Stoffe mit geringer spezifischer Aktivität (LSA) werden in die drei Gruppen LSA-I, LSA-II und LSA-III unterteilt. Zur Gruppe LSA-I gehören folgende Stoffe:

- i) Uran- und Thoriumerze und deren Konzentrate sowie andere Erze, die in der Natur vorkommende Radionuklide enthalten und deren Verarbeitung für die Nutzung dieser Radionuklide vorgesehen ist;
- ii) Natürliches Uran, abgereichertes Uran, natürliches Thorium und deren Verbindungen oder Gemische, die unbestrahlt und in festem oder flüssigem Zustand sind;
- iii) Radioaktive Stoffe, für die der A_2 -Wert (Tabelle 2.2.7.2.2.1 der ADR) unbegrenzt ist, außer spaltbare Stoffe, die nach Absatz 2.2.7.2.35. der ADR nicht freigestellt sind, oder
- iv) Andere radioaktive Stoffe, in denen die Aktivität gleichmäßig verteilt ist und die geschätzte mittlere spezifische Aktivität das 30ig-fache der Werte der in den Absätzen 2.2.7.2.2.1 bis 2.2.7.2.2.6 der ADR festgelegten Aktivitätskonzentrationen nicht überschreitet, außer spaltbare Stoffe, die nach Absatz 2.2.7.2.35. der ADR nicht freigestellt sind.

Zur Gruppe der LSA-II-gehören folgende Stoffe:

- i) Wasser mit einer Tritium-Konzentration bis zu 0,8 TBq/l oder
- ii) Andere Stoffe, in denen die Aktivität gleichmäßig verteilt ist und die geschätzte mittlere spezifische Aktivität $10^{-4} A_2/g$ bei festen Stoffen und Gasen und $10^{-5} A_2/g$ bei flüssigen Stoffen nicht überschreitet.

Zur Gruppe der LSA-III gehören feste Stoffe (z.B. verfestigte Abfälle, aktivierte Stoffe), ausgenommen den Vorschriften des Absatzes 2.2.7.2.3.1.3 entsprechende pulverförmige Stoffe, bei denen

- i) Die radioaktiven Stoffe in einem festen Stoff oder einer Ansammlung fester Gegenstände gleichmäßig oder in einem festen kompakten Bindemittel (wie Beton, Bitumen, Keramik) im Wesentlichen gleichmäßig verteilt sind;
- ii) Die radioaktiven Stoffe relativ unlöslich oder innerhalb einer relativ unlöslichen Grundmasse enthalten sind, so dass selbst bei Verlust der Verpackung der sich durch vollständiges Eintauchen in Wasser für sieben Tage ergebende Verlust an radioaktiven Stoffen je Versandstück durch Auslaugung $0,1 A_2$ nicht übersteigt, und
- iii) Die geschätzte mittlere spezifische Aktivität des festen Stoffes mit Ausnahme des Abschirmmaterials $2 \times 10^{-3} A_2/g$ nicht übersteigt.

In Absatz 2.2.7.2.3.1.3 der ADR wird die Beschaffenheit eines LSA-III-Stoffes geregelt. Demnach ist ein LSA-III-Stoff ein fester Stoff, der so beschaffen sein muss, dass die Aktivität

in Wasser 0,1 A₂ nicht überschreitet, wenn der Gehalt eines Versandstückes der vorgeschriebenen Prüfung unterzogen wurde.

Oberflächenkontaminierte Gegenstände (SCO)

Die oberflächenkontaminierten Gegenstände (surface contaminated objects, SCO) werden in die zwei Gruppen SCO-I und SCO-II unterteilt. SCO-I sind feste Gegenstände auf denen

- i) Die nicht festhaftende Kontamination auf der zugänglichen Oberfläche, gemittelt über 300 cm² (oder über die Gesamtoberfläche bei weniger als 300 cm²), 4 Bq/cm² für Beta- und Gammastrahler sowie Alphastrahler geringer Toxizität oder 0,4 Bq/cm² für alle anderen Alphastrahler nicht überschreitet und
- ii) Die festhaftende Kontamination auf der zugänglichen Oberfläche, gemittelt über 300 cm² (oder über die Gesamtoberfläche bei weniger als 300 cm²), 4×10^4 Bq/cm² für Beta- und Gammastrahler sowie Alphastrahler geringer Toxizität oder 4×10^3 Bq/cm² für alle anderen Alphastrahler nicht überschreitet und
- iii) Die Summe aus nicht festhaftender Kontamination und festhaftender Kontamination auf der unzulänglichen Oberfläche, gemittelt über 300 cm² (oder über die Gesamtfläche bei weniger als 300 cm²), 4×10^4 Bq/cm² für Beta- und Gammastrahler sowie Alphastrahler geringer Toxizität oder 4×10^3 Bq/cm² für alle anderen Alphastrahler nicht überschreitet.

SCO-II sind feste Gegenstände, auf deren Oberfläche entweder die festhaftende oder die nicht festhaftende Kontamination die für SCO-I-Gegenstände festgelegten, jeweils zutreffenden Grenzwerte überschreiten und auf dem

- i) Die nicht festhaftende Kontamination auf der zugänglichen Oberfläche, gemittelt über 300 cm² (oder über die Gesamtoberfläche bei weniger als 300 cm²), 400 Bq/cm² für Beta- und Gammastrahler sowie für Alphastrahler geringer Toxizität oder 40 Bq/cm² für alle anderen Alphastrahler nicht überschritten wird und
- ii) Die festhaftende Kontamination auf der zugänglichen Oberfläche, gemittelt über 300 cm² (oder über die Gesamtoberfläche bei weniger als 300 cm²), 8×10^5 Bq/cm² für Beta- und Gammastrahler sowie Alphastrahler geringer Toxizität oder 8×10^4 Bq/cm² für alle anderen Alphastrahler nicht überschreitet und
- iii) Die Summe aus nicht festhaftender Kontamination und festhaftender Kontamination auf der unzulänglichen Oberfläche, gemittelt über 300 cm² (oder über die Gesamtfläche bei weniger als 300 cm²), 8×10^5 Bq/cm² für Beta- und Gammastrahler sowie Alphastrahler geringer Toxizität oder 8×10^4 Bq/cm² für alle anderen Alphastrahler nicht überschreitet.