

BfS Bundesamt für Strahlenschutz

Deckblatt

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NNNN	
9K			EBK	RB	0008	03	Stand: 18.10.95

EU 426

Titel der Unterlage:

Anforderungen an die zulässige Massenkonzentration und zulässige Massen an spaltbaren Stoffen in Abfallgebinden für das geplante Endlager Konrad (ET-IB-46-REV-3)

Ersteller:

BfS

Textnummer:

Stempelfeld:

Freigabe für Behörden:

Freigabe im Projekt:

Datum und Unterschrift

Datum und Unterschrift

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS.

BfS Bundesamt für Strahlenschutz

Revisionsblatt

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: II
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NNNN	
9K			EBK	RB	0008	00	EU 426 Stand: April 1991

Titel der Unterlage:

Anforderungen an die zulässige Massenkonzentration und zulässige Massen an spaltbaren Stoffen in Abfallgebinden für das geplante Endlager Konrad (ET-IB-46)

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer (Zeichn.)	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
01	21.05.91	ET 2.4	IL	5	R	Ersatz der Tab. 1
				6	R	
				8	R	
				11	R	
				16	R	
				17	R	
				28	S	
				29	S	
				31 -	S	
				36		
02	20.01.92	ET 2.4	IL	42 -	S	Betonbehälter Typ III nicht mehr aufgeführt, da kein standardisiertes Gebinde, vgl. Tab. 1
				43		
				46	S	
				41	S	
				41	S	
				41	S	
02	20.01.92	ET 2.4	IL	1	R	Angabe der Masse in Tab. 14: kg statt g
				5	R	
				8,10	R	
				11	R	
				17	R	
				25	R	
03	18.10.95	ET 2.4	TL	1	R	Neuer Revisionsstand
				2	R	
				4	R	
				5	R	
				6	R	
				7	S	
				8	R	
				8	S	
				10	R	
				11	R	
				11	R	

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Revision
 mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

BfS Bundesamt für Strahlenschutz

Revisionsblatt

Projekt	PSP-Element	Obj.Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: III
NAAN	NNNNNNNNNN	NNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NNNN	
9K			EBK	RB	0008	00	Stand: April 1991 Fehler!

EU 426

Titel der Unterlage:

Anforderungen an die zulässige Massenkonzentration und zulässige Massen an spaltbaren Stoffen in Abfallgebinden für das geplante Endlager Konrad (ET-IB-46)

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer (Zeichn.)	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
				12,15 19,21 22,38 39,42 46	R	Verweis auf Endlagerungsbedingungen /20/ ergänzt
				12	R	Verweise auf /5/, /6/, /7/ u. /10/ gestrichen
				13	R	Verweise auf „GRS“, /6/ u. /7/ gestrichen
				13,14 17,21 34,35 36,37 41,42 43	S	Plutonium-Vektoren 1 u. 2 und darauf bezogene Textstellen gestrichen,
				13	R	Kap. 3.2, 1. Absatz: Satz mit Verweise auf /10/ gestrichen
				14	R	Verweise auf /6/ u. /7/ gestrichen
				14,20 21,22 37,38 47	S	Grenzwerte für Container mit in Zement/Beton vergossenen Innenbehältern und darauf bezogene Textstellen gestrichen
				15	R	Halbsatz mit Verweise auf /15/ gestrichen
				16	R	Kap. 3.5: Verweis u. Satz mit Verweis auf /9/ gestrichen
				17	R	Verweis auf /17/ gestrichen
				18	R	Verweise auf /6/, /4/, /17/ u. /10/ gestrichen, Textstelle „unter bestimmten Voraussetzungen“ im 1. Satz des 4. Absatzes von Kap. 4.2 konkretisiert
				19	R	Verweis auf Tab. /14/ gestrichen
				20	R	Verweis auf Rechenprogramm ANKONA /18/ gestrichen
				22	R	Verweis /8/ durch TÜV Hannover ersetzt
				24,25	R	Literaturverzeichnis aktualisiert
				27	R	Bezeichnung von Tab. 1 an EU 117 angepaßt
				28	V	Fußnote zur Erklärung von Gußbehältern Typ II * ergänzt
				48-50	S	Anhang mit Angaben zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit in der Pufferhalle bei zweilagiger Stapelung von bis zu 258 Containern ergänzt

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Revision
 mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ

Fachbereich Nukleare Entsorgung und Transport

Anforderungen an die zulässige Massenkonzentration und zulässige Massen an spaltbaren Stoffen in Abfallgebinden für das geplante Endlager Konrad

Interner Arbeitsbericht

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	4
2. Begrenzung der zulässigen Massenkonzentration spaltbarer Stoffe im Abfallprodukt	6
3. Begrenzung der zulässigen Masse an spaltbaren Stoffen pro Abfallgebinde	11
3.1 Zulässige Masse an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer	12
3.2 Zulässige Masse an spaltbaren Stoffen pro Abfallgebinde	13
3.3 Berücksichtigung höherer spaltbarer Aktiniden in den Kritikalitätsbetrachtungen	15
3.4 Bewertung der einlagerbaren Massen an spaltbaren Stoffen anhand der insgesamt einlagerbaren Aktivität	16
3.5 Zulässige Massen für Materialien mit besonderen Moderator- und Reflektoreigenschaften	16
4. Ableitung eines Summenkriteriums	17
4.1 Summenkriterium für ein Radionuklid in einem Abfallgebinde	17
4.2 Summenkriterium für die gemischte Einlagerung von Abfallgebinden	18
5. Festlegung der Aktivitätsgrenzwerte	21
6. Literaturverzeichnis	24
7. Tabellen	26
8. Anhang	48

Zusammenfassung

Die Grundanforderungen, denen alle Abfallprodukte genügen müssen, die in der Schachanlage Konrad endgelagert werden sollen, enthalten eine maximal zulässige Massenkonzentration an spaltbaren Stoffen im Abfallprodukt. Darüber hinaus gelten behälterabhängige Massenbegrenzungen pro Abfallgebinde für die Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241. Im vorliegenden Bericht werden diese Anforderungen aus den Ergebnissen zur Kritikalitätssicherheit im Endlager Konrad abgeleitet.

1 Einleitung

Zur Endlagerung in der Schachanlage Konrad sind auch Abfallgebinde vorgesehen, die Restmengen an spaltbaren Stoffen in fester Form enthalten können.

Generell können Kernspaltungen von Neutronen unterschiedlicher Energie ausgelöst werden. Je nach Neutronenenergie unterscheidet man dabei schnelle, epithermische und thermische Neutronen.

Radionuklide, die insbesondere durch thermische Neutronen gespalten werden, bezeichnet man als thermisch spaltbar. Nur solche Radionuklide sind für die folgenden Betrachtungen relevant. Darunter werden im Atomgesetz /1/ die Radionuklide Pu-239, Pu-241, U-233 und U-235 verstanden. In den Transportbestimmungen für gefährliche Güter /2/ wird unter "spaltbaren Stoffen" darüber hinaus noch das Radionuklid Pu-238 aufgeführt, das jedoch nur durch schnelle Neutronen spaltbar ist und deshalb im folgenden nicht weiter betrachtet wird. Daneben gibt es noch weitere Radionuklide (höhere Aktiniden), die durch thermische und schnelle Neutronen spaltbar sind wie z. B. einige Cm-Isotope. Auf die Berücksichtigung dieser Radionuklide im Rahmen der Kritikalitätsbetrachtungen wird ebenfalls eingegangen.

Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse ist untersucht worden, ob die Möglichkeit eines Kritikalitätsstörfalls während der Einlagerungsphase durch kritische Anordnungen in einer Einlagerungskammer oder in der Nachbetriebsphase durch Zutritt von Wässern an das Einlagerungsgut und Auslaugung des gesamten Spaltstoffinventars gegeben ist.

Für die Nachbetriebsphase ist dabei einerseits eine homogene Spaltstoffverteilung betrachtet worden, und es sind unter konservativen Randbedingungen obere Grenzwerte für Spaltstoffverteilungen ermittelt worden. Als Ergebnis zeigt sich, daß die berechneten Werte, die sich aufgrund der Planungsdaten ergeben und bei denen als Spaltstoffkonzentration der nach den Transportbestimmungen maximal zulässige Wert zugrunde gelegt worden ist, um mehrere Größenordnungen unter diesen Grenzwerten liegen.

Die Einlagerungskammern in der Schachanlage Konrad werden zwar grundsätzlich söhlig aufgefahren und die Kammersohle wird planiert, es können jedoch geringfügige Abweichungen (z. B. Unebenheiten) von bis zu 2,5 % auftreten.

Im Fall einer inhomogenen Spaltstoffverteilung wird daher für eine begrenzte Anzahl von Abfallgebinden unterstellt, daß nach einem Wasserzutritt die Abfallgebidematrix (Zement) korrodiert und das gesamte Spaltstoffinventar ausgelaugt wird und sich dann auf der Kammersohle im Bereich einer angenommenen Vertiefung ansammelt. Auf der Basis der vorhandenen Abfalldaten ist dabei ein bestimmter Radionuklidvektor angenommen worden. Die Ergebnisse zeigen, daß auch in diesem Fall keine kritische Spaltstoffanordnung entstehen kann.

In einem weiteren Schritt sind maximal zulässige Massenkonzentrationen im Abfallprodukt und Massenbegrenzungen pro Abfallgebinde abgeleitet worden. Dazu sind zur Vereinfachung die konservativen Randbedingungen zur inhomogenen Spaltstoffverteilung angesetzt worden, so wird z. B. eine Kugelgeometrie der Spaltstoffzone unterstellt. Darüber hinaus sind diese Ergebnisse mit Rechnungen unter der Annahme einer Halbkugelgeometrie der Spaltstoffzone bei gleichen sonstigen Randbedingungen

verglichen worden. Außerdem sind noch Kritikalitätsrechnungen in Schichtgeometrie für eine Einlagerungskammer durchgeführt worden.

Der vorliegende Bericht umfaßt die Ergebnisse für die Festlegung der maximal zulässigen Massenkonzentration an spaltbaren Stoffen im Abfallprodukt und Massenbegrenzungen für die Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241, obwohl z. B. für Pu-241 bereits restriktive Anforderungen aus den Analysen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins resultieren. Damit wird konsequent die Philosophie eingehalten, daß die Anforderungen aus den einzelnen Anforderungsbereichen unabhängig voneinander bestehen und unabhängig voneinander überprüft werden müssen.

Darüber hinaus wird auf die im Zwischenbericht des TÜV-Hannover von 1990 aufgeführten Hinweise zur Kritikalitätssicherheit eingegangen.

Die abgeleiteten zulässigen Massenkonzentrationen im Abfallprodukt und nuklidspezifischen Massenbegrenzungen pro Abfallgebinde stellen die aus sicherheitstechnischer Sicht einzuhaltenden Obergrenzen dar, die unter sehr konservativen Annahmen durch Kritikalitätsberechnungen ermittelt wurden. Unabhängig von diesen aus den Analysen ermittelten einlagerbaren Massen bzw. Aktivitäten - auch aus den anderen Teilen der Sicherheitsanalysen - werden in das geplante Endlager Konrad nur radioaktive Abfälle eingelagert, die - soweit zutreffend - aus der Kernmaterialüberwachung entlassen sind. Da für diese Entlassung aber keine festgelegten Zahlenwerte existieren, können sie in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt werden.

2 Begrenzung der zulässigen Massenkonzentration spaltbarer Stoffe im Abfallprodukt

Bei den Anlieferungen von Abfallgebinden zum Endlager Konrad (d. h. beim Transport der Abfallgebinde von den Ablieferungspflichtigen zum Endlager) ist die Kritikalitätssicherheit gewährleistet durch die Einhaltung der Transportvorschriften. Die dazu notwendigen Voraussetzungen bleiben auch auf dem Anlagengelände beim Parken der Lkw auf den dafür vorgesehenen Halteplätzen bzw. der Waggons auf dem Puffergleis (hinter der langen Abschirmmauer) erhalten.

Die geometrische Anordnung der Anlieferungsfahrzeuge im geparkten Zustand (Waggons hintereinander, Lkw in zwei getrennten Reihen hintereinander), die aus Abb. 1 ersichtlich ist, ist darüberhinaus ohnehin abgedeckt durch die modellhafte Anordnung in der Einlagerungskammer (s. u.).

Es bleibt daher zu prüfen, ob bei der Handhabung einzelner Abfallgebinde oder Transporteinheiten sowie bei der Lagerung von Transporteinheiten in der Pufferhalle und der Einlagerung der Abfallgebinde in den Einlagerungskammern die Kritikalitätssicherheit gegeben ist.

In der Betriebsphase des Endlagers Konrad ist aufgrund der Erfahrung aus dem Betrieb der Schachtanlage als Eisenerzbergwerk ein Wasserzutritt an das Einlagerungsgut auszuschließen, so daß sich eine Aussage zur Kritikalität auf die Untersuchung beschränkt, inwieweit bei der Einlagerung der Abfallgebinde eine kritische Anordnung entstehen kann.

Dazu wird modellhaft eine Anordnung von acht Containern (je zwei Container nebeneinander und zwei Container übereinander in zwei Reihen gestapelt) betrachtet (s. Abb. 2).

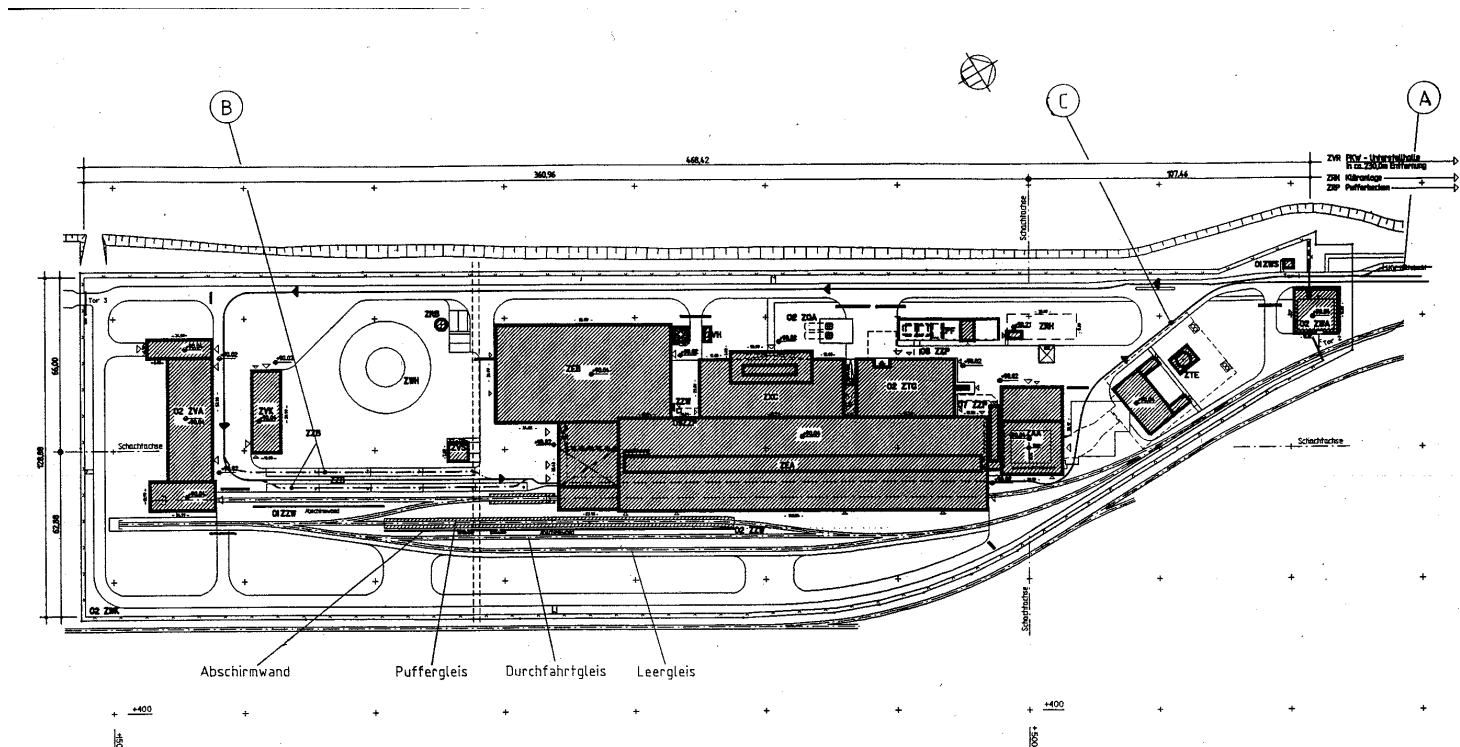
Es wird angenommen, daß sich in einem Volumenelement (Würfelvolumen) eines jeden dieser Abfallgebinde eine bestimmte Konzentration an spaltbaren Stoffen befindet. Als Spaltstoff wird für diese Betrachtungen reines Pu-239 als Oxid unterstellt.

Zur Bestimmung der zulässigen Massenkonzentration spaltbarer Stoffe im Abfallprodukt sind unter den oben angegebenen Annahmen Modellrechnungen durchgeführt und der Zustand optimaler Moderation durch Wasser für das jeweilige Modell bestimmt worden.

Die Rechnungen haben ergeben, daß bei einer Massenkonzentration von 50 g an spaltbaren Stoffen pro 100 l Abfallprodukt der Wert k_{∞} unter 0,6 liegt. Die Größe k_{∞} ist der Multiplikationsfaktor für ein infinites System, $k_{\infty} = 1$ bedeutet dabei, daß das System kritisch und $k_{\infty} < 1$, daß das System unterkritisch ist.

Dabei ist anzumerken, daß der Multiplikationsfaktor für die volle Ausschöpfung der zulässigen Massenkonzentration von 50 g Pu-239 pro 100 l Abfallprodukt berechnet wurde. Die zulässige Masse an Pu-239 beträgt aber z. B. für einen Container Typ III nur 220 g (vgl. Tabelle 6); d. h. die zulässige Massenkonzentration ist in diesem Fall um eine Größenordnung höher angesetzt worden. Damit werden auch mögliche Inhomogenitäten der spaltbaren Stoffe im Abfallprodukt abgedeckt.

Abb. 1: Tagesanlagen am Schacht Konrad 2



- | | | | |
|--------|------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------|
| ZEA | Umlade halle | ZEB | Pufferhalle |
| ZAA | Förderturm | ZVS | Gebäude für Steuerstand |
| ZTE | Schachthallenanbau und Schachtkeller | ZVZ | Trocknungsanlage |
| 02 ZVA | Wachgebäude | 02 ZVA | Werkstatt mit Lokschuppen und Friktionswinden |
| ZPF | Freiluft-Trafoanlage | ZVB | Bereitstellfläche |
| 02ZWK | Zaun | ZRH | Grubenwässer-Übergabestation |
| 01 ZWS | Immissionsmeß-Stelle | ZVH | Flaschenlager |
| ZWH | Hubschrauberlandemöglichkeit | ZVK | Gebäude für Ersatzfördermittel |
| 02 ZTG | Heizzentrale mit Schaltstation und Kamin | ZZB | LKW-Parkplätze |
| 02 ZQA | Heizöllager | ZRB | Löschwasserentnahmestation |
| ZRN | Kläranlage | ZVR | PKW- Unterstellhalle |
| ZRP | Pufferbecken | ZXC | Büro- und Sozialgebäude |

Lageplan Konrad 2
-Übersichtsplan-

- Zeichenerklärung:
- | | | | |
|---|--------------------------|---|-----------------------|
| ■ | Schranken, fernbedienbar | A | Halteposition Zufahrt |
| → | LKW - Fahrstrecke | B | LKW - Parkplätze |
| ⌘ | Einfriedung | C | Halteposition Abfahrt |

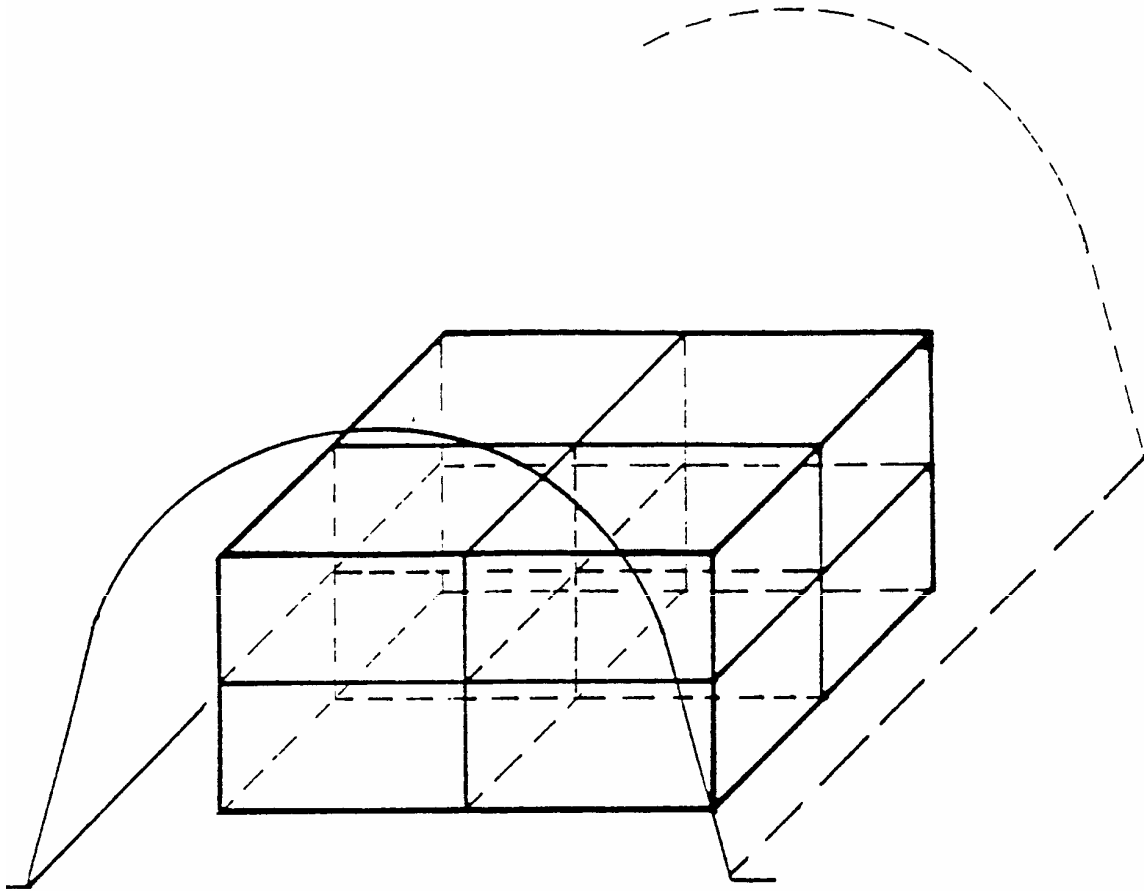


Abb. 2: Stapelung von Containern im Kammerquerschnitt

Bei einer Massenkonzentration von 50 g an spaltbaren Stoffen pro 100 l Abfallprodukt ist $k_{\infty} < 1$ sogar für den konservativsten Fall gewährleistet, daß reines Pu-241 als Oxid vorliegt.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die in Abb. 2 dargestellte Stapelung von Abfallgebinden auch die mögliche Konfiguration von Abfallgebinden in der Pufferhalle abdeckt. Für eine Anordnung von maximal 258 Transporteinheiten in zwei Stapelungen - in der ersten Lage können 154, in der zweiten Lage 104 Stellplätze belegt werden (s. Abb. 3, Variante 2) - sind die berechneten Multiplikationsfaktoren in allen Fällen kleiner oder gleich 0,8. (Das verwendete Berechnungsmodell ist im Anhang beschrieben.) Somit ist auch bei der Lagerung von Transporteinheiten in der Pufferhalle die Kritikalitätssicherheit gewährleistet. Dabei ist anzumerken, daß die maximale Belegung von 258 Transporteinheiten in der Pufferhalle nur für den Fall einer Störung vorgesehen ist und in der Praxis nicht damit zu rechnen ist, daß alle gepufferten Abfallgebinde die in der Rechnung unterstellte Massenkonzentration spaltbarer Stoffe im Abfallprodukt ausschöpfen.

Um den Störfallbetrachtungen Rechnung zu tragen, müssen brennbare radioaktive Abfälle, die in das geplante Endlager Konrad eingelagert werden sollen und die spaltbare Stoffe außer Natururan und angereichertem Uran mit einer Masse von mehr als 1 g pro Abfallgebinde enthalten, mit einer nicht brennbaren Abfallmatrix fixiert werden. Weitergehende Anforderungen an die Abfallprodukte bestehen nicht. Die

o. g. Anforderung entfällt, wenn das Abfallprodukt allseitig von einer inaktiven Schicht mit einem Wärmeleitwiderstand von mindestens $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ umgeben ist oder in einem Abfallbehälter verpackt ist, der der Abfallbehälterklasse II zugeordnet wird.

Die Begrenzung der Massenkonzentration auf bis zu 50 g an spaltbaren Stoffen pro 100 l Abfallprodukt, die sich aus den Anforderungen zur Kritikalitätssicherheit des Endlagers Konrad in der Betriebsphase ergeben, bedeutet dabei eine Begrenzung der Massenkonzentration an thermisch spaltbaren Radionukliden gemäß Kap. 1 in ihrer Gesamtheit, d. h. die zulässigen 50 g/100 l dürfen nicht von jedem Radionuklid einzeln ausgeschöpft werden. Die zulässigen 50 g an spaltbaren Stoffen umfassen - sofern im Abfallgebilde enthalten - auch die höheren spaltbaren Aktiniden.

Diese Begrenzung der Massenkonzentration erlaubt die Einlagerung von Abfallgebilden, die nach der GGVS /2/ als "Versandstücke mit spaltbaren Stoffen" eingestuft werden müssen. Diese Einstufung ist notwendig, wenn Versandstücke in jedem beliebigen 10 l-Volumen mehr als 5 g spaltbare Stoffe enthalten. Eine homogene Verteilung der spaltbaren Stoffe im angegebenen Volumen ist dabei nicht gefordert.

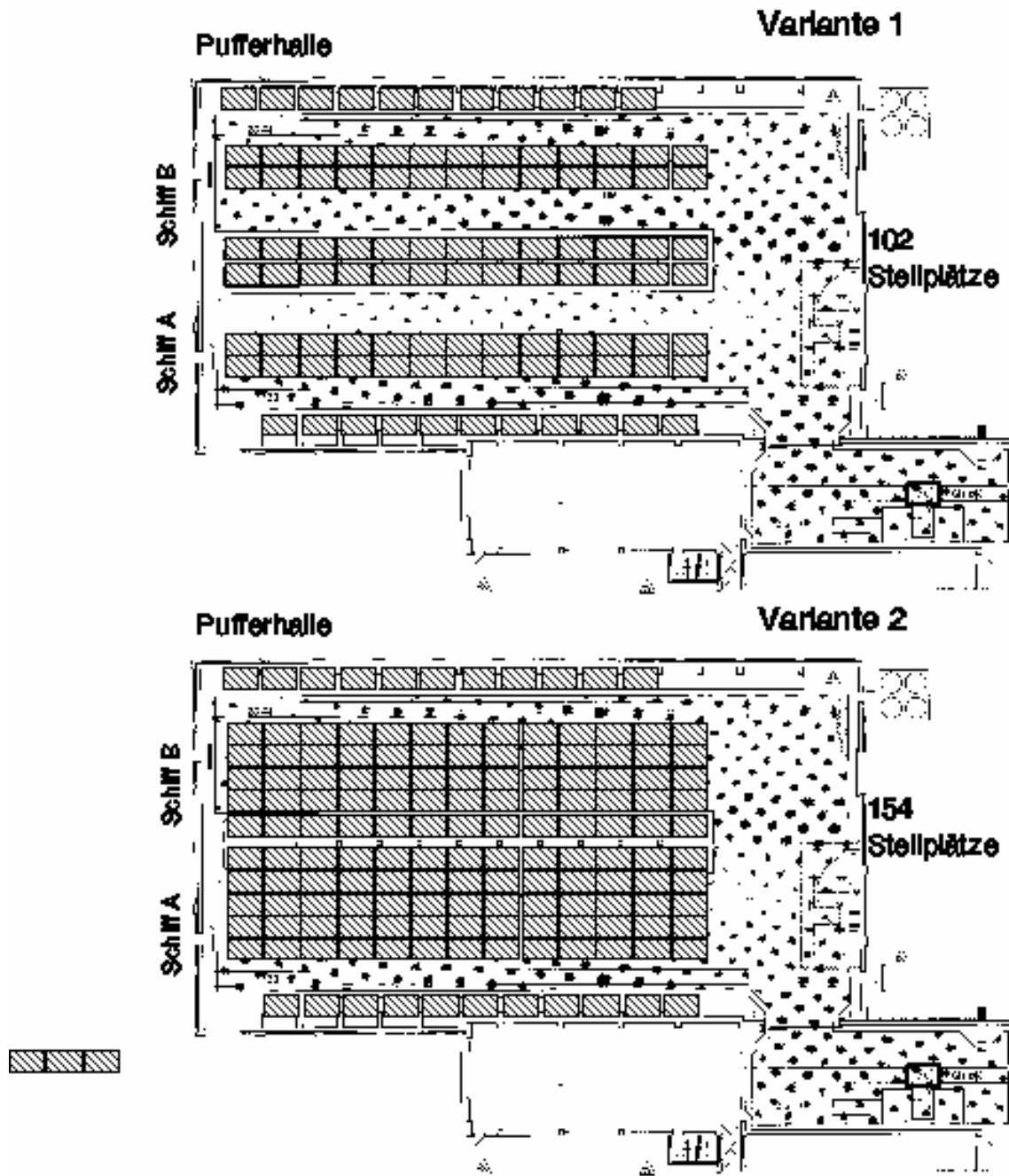


Abb. 3: Anzahl der Einstellplätze in der Pufferhalle

3 Begrenzung der zulässigen Masse an spaltbaren Stoffen

In Kap. 2 ist die Begrenzung der Massenkonzentration an spaltbaren Stoffen im Abfallprodukt erläutert worden. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, in der die standardisierten Abfallbehälter aufgeführt sind, die für die Endlagerung radioaktiver Stoffe in der Schachanlage Konrad vorgesehen sind, können die Bruttovolumina bis zu $10,9 \text{ m}^3$ betragen. Die Stahlblechcontainer haben eine Wanddicke von $0,3 \text{ mm}$, so daß in diesen Fällen das Nettovolumen nur geringfügig geringer ist.

Berücksichtigt man außerdem, daß im Querschnitt einer Einlagerungskammer, d. h. in einem Stapelabschnitt, bei Verwendung der standardisierten Abfallbehälter zwischen 5 und 39 Abfallgebinde gestapelt werden können, so wird deutlich, daß hinsichtlich einer Massenbegrenzung an spaltbaren Stoffen in einem Abfallgebinde die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase die schärfere Einschränkung darstellt, da - wie in Kap. 1 bereits ausgeführt - konservativ die selektive Auslaugung des gesamte Spaltstoffes aus der Abfallgebundematrix durch zutretendes Wasser und seine Ansammlung und Aufkonzentration auf der Sohle der Einlagerungskammer unterstellt wird.

Dabei wird konservativ von der Annahme ausgegangen, daß sich eine Vertiefung in der Sohle der Einlagerungskammer jeweils unter einem Stapelabschnitt befindet; die Länge eines Stapelabschnittes, die zwischen $1,25 \text{ m}$ und $2,1 \text{ m}$ variiert, spielt für die Betrachtungen hier keine Rolle, da bei einer größeren Senke über mehrere Stapelabschnitte sogar höhere Massen an spaltbaren Stoffen zulässig sind (s. u.).

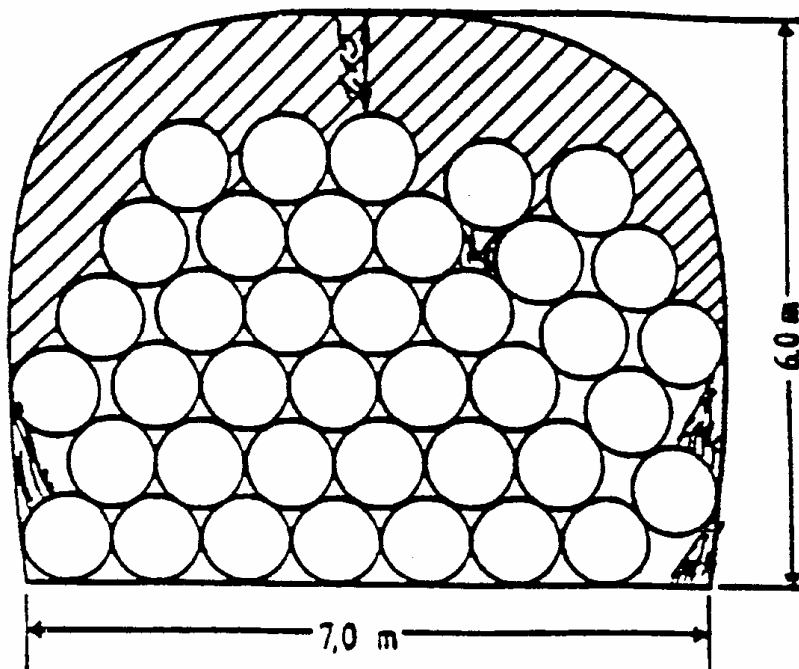


Abb. 4: Modellmäßige Darstellung der Stapelung zylindrischer Abfallgebinde in einer Einlagerungskammer

In den Endlagerungsbedingungen /20/ ist ausgeführt, daß grundsätzlich die standardisierten Abfallbehälter eingelagert werden. Es wird aber darauf hingewiesen, daß z. B. Abfallbehälter, die zur Verpackung von radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufbereitung von abgebrannten Brennelementen aus Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland durch COGEMA/BNFL verwendet werden, von diesen Außenabmessungen abweichen können. In solchen Fällen werden vor der Annahme durch das Endlager die entsprechenden Grenzwerte zur Einhaltung der Kritikalitätssicherheit festgelegt. Die generelle Vorgehensweise ist in Kap. 3.2 beschrieben.

Die in den Kritikalitätsuntersuchungen zugrunde gelegten Abfallgebindeanzahlen im Querschnitt einer Einlagerungskammer, die in Tabelle 2 aufgeführt sind, müssen als Obergrenze im Betrieb des Endlagers eingehalten werden. Aufgrund inzwischen fortgeschrittener Planungen bez. des Stapelns von Containern in der Einlagerungskammer durch das Stapelfahrzeug sind die Containerzahlen im Stapelabschnitt z. T. geringer als in diesem Bericht angenommen.

3.1 Zulässige Masse an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer

Bei der Ermittlung der zulässigen Masse an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer sind konservative Randbedingungen gewählt worden, d. h. z. B. ein Reflektor aus 30 cm Normalbeton und Kugelgeometrie der Spaltstoffzone. Lediglich der experimentell bestimmte Salzgehalt des Grubenwassers /11/, der aufgrund des Chlor-Anteils reaktivitätsmindernd wirkt, ist in die Berechnungen eingegangen, wobei das Grubenwasser des Hils mit dem geringeren Chlor-Anteil unterstellt worden ist. Die Kritikalitätsrechnungen werden dabei getrennt für die Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 durchgeführt.

Für Uran ist es sinnvoll, Uran mit niedriger und hoher Anreicherung getrennt zu untersuchen. Dazu ist als spaltbarer Reststoff in den Abfallgebinden UO_2 mit auf 5 % bzw. 95 % U-233 bzw. U-235 angereichertem Uran zugrunde gelegt worden. Die im folgenden aufgeführten Massenkonzentrationen gelten nicht für in den radioaktiven Abfällen enthaltenes Natururan und abgereichertes Uran.

U-233

Die Rechnungen haben für das unterstellte Störfallszenario ergeben, daß im Falle des niedrig angereicherten UO_2 der Wert $k_{\text{eff}} = 1$ bei einer Masse von 4,0 kg U-233 in einem Kammerquerschnitt erreicht wird, im Falle des hoch angereicherten UO_2 bei einer Masse von 1,16 kg U-233. Diese Massen sind unter den obengenannten Randbedingungen begrenzend für die einlagerbaren Massen im Querschnitt einer Einlagerungskammer.

U-235

Die Rechnungen haben ergeben, daß im Falle des niedrig angereicherten UO_2 der Wert $k_{\text{eff}} = 1$ bei einer Masse von 13,2 kg U-235 in einem Kammerquerschnitt erreicht wird, im Falle des hoch angereicherten UO_2 bei einer Masse von 2,04 kg U-235. Diese Massen sind unter den obengenannten Randbedingungen begrenzend für die einlagerbaren Massen im Querschnitt einer Einlagerungskammer.

Pu-239

Die Rechnungen für das Radionuklid Pu-239 sind in Analogie zur Berechnung der zulässigen Massen im Querschnitt einer Einlagerungskammer für die Uran-Isotope durchgeführt worden.

Diese Rechnungen für reines Pu-239-Oxid haben ergeben, daß die kritische Masse an spaltbaren Stoffen im Querschnitt der Einlagerungskammer bei 1,12 kg Pu-239 liegt.

Pu-241

Die Rechnungen haben für reines Pu-241-Oxid ergeben, daß die kritische Masse an spaltbaren Stoffen im Querschnitt der Einlagerungskammer bei 0,57 kg Pu-241 liegt.

Außer den in diesem Bericht als Basis verwendeten Kritikalitätsrechnungen mit einem Kugelmodell sind zum Vergleich Rechnungen in Halbkugel- bzw. Schichtgeometrie durchgeführt worden.

Dabei sind kleinste kritische Massen in Halbkugelgeometrie mit allseitigem Betonreflektor bei optimaler Moderation für reines Pu-239 und für das Isotopengemisch gemäß Tabelle 3 berechnet worden.

Der Vergleich mit den entsprechenden Werten der Vollkugel zeigt, daß sich unter Zugrundelegung des Halbkugelmodells geringfügig (rd. 15 %) höhere Grenzwerte ableiten lassen.

Die Rechnungen haben außerdem gezeigt, daß die angenommene Vertiefung den ungünstigsten Fall darstellt, da sich bei Kritikalitätsrechnungen in Schichtgeometrie - also z. B. auch bei der Modellierung einer größeren Senke - höhere zulässige Massen ergeben.

3.2 Zulässige Masse an spaltbaren Stoffen pro Abfallgebinde

Aus den Ergebnissen der Rechnungen zur Bestimmung der zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer, getrennt für die Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 in Kap. 3.1 beschrieben, lassen sich in einem weiteren Schritt Begrenzungen pro Abfallgebinde ableiten. Da sich die zulässige Masse an spaltbaren Stoffen aus der Massenbegrenzung des Stapelabschnittes durch Division der vorgesehenen Abfallgebindeanzahl in diesem Stapelabschnitt ergibt, können - z. B. für die Wiederaufarbeitungsabfälle von Cogema und BNFL - bei Verwendung eines nichtstandardisierten Behälters und nach Festlegung der einzulagernden Anzahl pro Stapelabschnitt die entsprechenden zulässigen Massen festgeschrieben werden.

U-233

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 2 aufgeführten Abfallgebindeanzahlen im Querschnitt einer Einlagerungskammer ergeben sich die in Tabelle 4 zusammengestellten Massenbegrenzungen für U-233, getrennt nach Anreicherungsgrad und Behältertyp. Dabei sind 1,1 kg bzw. 4 kg U-233 angesetzt worden.

U-235

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 2 aufgeführten Abfallgebindeanzahlen im Querschnitt einer Einlagerungskammer ergeben sich die in Tabelle 5 zusammengestellten Massenbegrenzungen für U-235, getrennt nach Anreicherungsgrad und Behältertyp. Dabei sind 2 kg bzw. 13 kg U-235 angesetzt worden.

Pu-239

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 2 aufgeführten Abfallgebindeanzahlen im Querschnitt einer Einlagerungskammer ergeben sich die in Tabelle 6 zusammengestellten Massenbegrenzungen für Pu-239. Dabei sind 1,1 kg Pu-239 angenommen worden.

Die in Tabelle 6 angegebenen zulässigen Massen beziehen sich auf den Fall, daß das Abfallprodukt 100 % Pu-239 enthält.

Pu-241

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 2 aufgeführten Abfallgebindeanzahlen im Querschnitt einer Einlagerungskammer ergeben sich die in Tabelle 7 zusammengestellten Massenbegrenzungen für Pu-241. Dabei sind 0,55 kg Pu-241 angenommen worden.

Die bisherigen Rechnungen zur Begrenzung der zulässigen Masse an spaltbaren Stoffen berücksichtigen lediglich die maximal zulässige Gesamtmasse aller im Querschnitt der Einlagerungskammer befindlichen Abfallgebinde. Außerdem ist die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase untersucht worden. Dabei ist von dem Konzept einer kritikalitätssicheren Auslegung ausgegangen worden, wie es z. B. in /13, 14/ beschrieben ist. Danach muß unter den gegebenen Randbedingungen die Kritikalitätssicherheit auch bei Massenverdoppelung gewährleistet sein. Das führt zu einer Begrenzung der zulässigen Masse an spaltbaren Stoffen auf 45 % der kleinsten kritischen Kugelmasse.

Damit ergeben sich - bei optimaler Moderation - als maximal zulässige Spaltstoffmassen für ein einzelnes Abfallgebinde die in Tabelle 10 aufgeführten Werte. Diese maximal zulässigen Spaltstoffmassen gelten unter der Voraussetzung, daß das Abfallprodukt direkt in die Verpackung eingebracht worden ist.

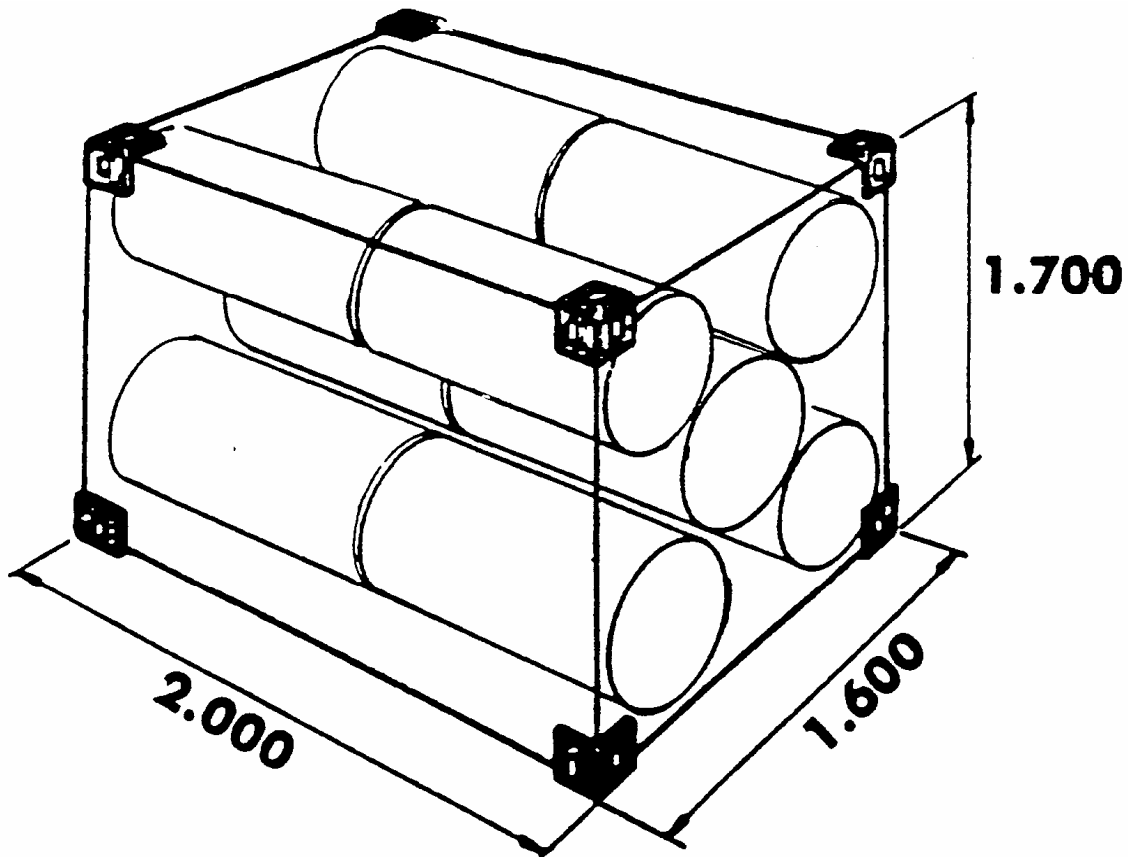


Abb. 5: Befüllung des Containers Typ VI mit 10 Fässern (nach /12/)

3.3 Berücksichtigung höherer spaltbarer Aktiniden in den Kritikalitätsbetrachtungen

Obwohl signifikante Massen an höheren spaltbaren Aktiniden in den radioaktiven Abfällen nicht erwartet werden, sind aus Gründen der Vollständigkeit Begrenzungen pro Abfallgebinde eingeführt worden. Dabei wird für die höheren spaltbaren Aktiniden die folgende Vorgehensweise gewählt, die auch die Möglichkeit einer Einzelfallbetrachtung eröffnet:

- In die Endlagerungsbedingungen /20/ werden die Radionuklide Np-237, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-243, Cm-244, Cm-245, Cm-247, Cf-249, Cf-251 mit den in Tabelle 12 angegebenen Massen aufgenommen mit dem Hinweis, daß bei Einhaltung der Werte die entsprechenden Abfallgebinde aus Sicht der Kritikalitätssicherheit endlagerfähig sind.
- Bei Überschreiten der genannten Werte erfolgt eine Prüfung des Einzelfalls. Bei einer solchen Prüfung werden dieselben Rechenmodelle und Randbedingungen wie in den bisherigen Analysen zur Kritikalitätssicherheit gewählt.

3.4 Bewertung der einlagerbaren Massen an spaltbaren Stoffen anhand der insgesamt einlagerbaren Aktivität

Im Kap. 3.1 ist die maximal zulässige Masse an spaltbaren Stoffen in einem Stapelabschnitt für die Radionuklide U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 abgeleitet worden. Unter Berücksichtigung der Gesamtanzahl der Stapelabschnitte - und ausgehend von dem ungünstigsten Fall, daß nur Gußbehälter Typ I mit einer Stapelabschnitt-Tiefe von 1,25 m eingelagert würden - kann die theoretisch sich ergebende Gesamtmasse ermittelt werden. Wenn man diese Werte für U-233 (rd. $3 \cdot 10^{12}$ Bq), Pu-239 (rd. $4,8 \cdot 10^{16}$ Bq) und Pu-241 (rd. $4 \cdot 10^{19}$ Bq) - für U-235 gibt es keine Anforderung für die insgesamt einlagerbare Aktivität - mit der maximal einlagerbaren Aktivität am Ende der Betriebszeit (Tabelle 13) vergleicht, so ergibt sich, daß die in Tabelle 13 genannten Aktivitätswerte mindestens um den Faktor 10 unterhalb der aus Kritikalitätssicherheit zulässigen Werte liegen. Damit ist ein noch weiterer Abstand zu möglichen kritischen Konfigurationen gegeben.

3.5 Zulässige Massen für Materialien mit besonderen Moderator- und Reflektoreigenschaften

Die oben beschriebenen Analysen zur Kritikalitätssicherheit haben als Moderator- und Reflektormaterialien im wesentlichen Wasser und Beton zugrunde gelegt.

Unter dem Gesichtspunkt der Physik der Neutronenvermehrung sind neben Wasser insbesondere D_2O , Beryllium und reiner Graphit wichtige Moderatoren.

Diese Stoffe können als Moderatoren und Reflektoren zu kleineren kritischen Konzentrationen bzw. Massen führen als Wasser, da sie niedrigere Absorptionsquerschnitte für thermische Neutronen besitzen.

Deshalb werden für diese Materialien Mengenbegrenzungen pro Abfallgebinde so festgelegt, daß die Möglichkeit einer reaktiveren Spaltstoffkonfiguration als mit Wasser- oder Betonreflektor verhindert wird. Bei Überschreitung der festgelegten Massen bzw. bei einer Vermischung von spaltbaren Stoffen mit den o. g. Materialien ist eine Einzelfallprüfung erforderlich. Die Massenbegrenzungen pro Abfallgebinde ohne Vermischung mit spaltbaren Stoffen sind in Tabelle 14 aufgeführt.

4 Ableitung eines Summenkriteriums

In Kap. 3 sind die Begrenzungen der Massen an U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241 erläutert worden. Dabei sind Anforderungen, die aus anderen Teilen der Sicherheitsanalysen resultieren (z. B. an Pu-241 aufgrund der Analysen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins), nicht berücksichtigt worden, um die einzelnen Anforderungen unabhängig voneinander betrachten und unabhängig voneinander überprüfen zu können. Eine Entkoppelung von Anforderungen aus verschiedenen Analysen hat den Vorteil, daß Änderungen in einem Anforderungsbereich keine Rückwirkungen auf die Anforderungen im anderen Bereich haben.

Die in Kap. 3 berechneten maximal zulässigen Massen dürfen nur ausgeschöpft werden, wenn ein Radionuklid im Abfall vorliegt. Für ein Radionuklidgemisch in einem Abfallgebilde ist es daher notwendig, eine Summenformel für die obengenannten Radionuklide zu entwickeln, wobei nicht nur eine Mischung dieser Radionuklide in einem Abfallgebilde, sondern auch die Mischung von Abfallgebilden im Querschnitt einer Einlagerungskammer berücksichtigt werden.

4.1 Summenkriterium für ein Radionuklidgemisch in einem Abfallgebilde

In den radioaktiven Abfällen liegt in der Regel ein Radionuklidgemisch vor, während sich die Massenbegrenzungen nur auf den Fall beziehen, daß sich entweder nur U-233 oder U-235 (unterschieden nach den beiden Anreicherungsgraden $\leq 5\%$ und $> 5\%$) oder Pu-239 oder Pu-241 im radioaktiven Abfall befindet.

Für ein beliebiges Gemisch aus den Radionukliden U-233, U-235, Pu-239, Pu-241 ist - in Analogie zur Vorgehensweise bei den Störfällen und bei der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins - eine Summenformel zu erfüllen, um die zulässige Masse an spaltbaren Stoffen pro Abfallgebilde nicht zu überschreiten.

Der Summenwert wird mit Hilfe der Formel

$$S_K(B) = \sum_i \frac{M_i}{M_i^*(B,a)} < 1 \quad (4.1)$$

berechnet. Dabei sind

S_K :	Summenwert (K = Index für Kritikalität)
M_i :	die Masse des Radionuklids i im Abfallgebilde
$M_i^*(B,a)$:	die zulässige Masse des Radionuklids i für den Behälter B und ggf. den Anreicherungsgrad a.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Analysen zu den Störfällen und der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins können für die Untersuchungen auf Kritikalitätssicherheit die einzelnen Radionuklide nicht unabhängig voneinander bzw. von anderen Radionukliden (z. B. U-238, Pu-238) betrachtet werden.

Die Anwendbarkeit der o. a. Summenformel ist daher nicht a priori gegeben und ist für das Beispiel U-235/Pu-239 verifiziert worden, da für die unterschiedlichen Radionuklidvektoren entsprechende optimale Moderationsverhältnisse unterstellt werden müssen, die dann zu jeweils geringfügig veränderten kritischen Massen führen können.

Die explizite Berechnung verschiedener Mischungsverhältnisse mit einem Transportprogramm zeigt jedoch, daß auf der Basis von 45 % der kleinsten kritischen Massen der Einzelnuclide diese Summenformel ohne Bedenken anwendbar ist. Die zulässigen Massen $M^*_i(B,a)$ in der Summenformel (4.1) berücksichtigen bereits die Begrenzung auf 45 % der kleinsten kritischen Kugelmasse.

Die für Kap. 3.3 aufgeführten höheren spaltbaren Aktiniden sind in der Summenformel (4.1) aufgrund der geringen zulässigen Massen (1/50 der kritischen Massen) nicht zu berücksichtigen.

4.2 Summenkriterium für die gemischte Einlagerung von Abfallgebinden

Da aufgrund des Abfallaufkommens nur eine geringe Zahl von Referenzabfällen mit einem nennenswerten Anteil an spaltbaren Stoffen zu erwarten ist, ist es sinnvoll, Abfallgebinde im Querschnitt einer Einlagerungskammer unter den Aspekten der Kritikalitätssicherheit mischen zu können. Eine solche Mischung ist möglich, da der primäre Grenzwert die maximal zulässige Masse für den Stapelabschnitt ist, der ja nur auf die maximal mögliche Anzahl der Abfallgebinde in diesem Stapelabschnitt aufgeteilt worden ist.

Abfallgebinde mit Summenwerten S_1 über 1 können ggf. zusammen mit Abfallgebinden eingelagert werden, die niedrige Summenwerte S_2 besitzen. Die Summenwerte sind dabei anzahlgewichtet zu mitteln. Eine Einlagerung ist dann möglich, wenn der gemittelte Summenwert unter 1 liegt.

Bei der - unter Kritikalitätssicherheitsaspekten - gemischten Einlagerung im Streckenquerschnitt werden Abfallgebinde mit gleichen äußeren Abmessungen und damit gleicher Stapelabschnittstiefe, aber verschiedenen Summenwerten zusammen im Querschnitt der Einlagerungskammer eingelagert.

Daneben ist bei gleichen oder annähernd gleichen geometrischen Verhältnissen und bei geeigneten Massenverhältnissen auch eine Mischung verschiedener Abfallgebinde (z. B. Container Typ V und VI) innerhalb eines Stapelabschnitts möglich und sinnvoll, da gerade die Abfälle aus der kerntechnischen Industrie mit höheren Massen an spaltbaren Stoffen überwiegend im Container Typ VI angeliefert werden. Dieser Containertyp ist ansonsten nicht sehr weit verbreitet, so daß aus diesem Grund eine Mischung unter Kritikalitätsaspekten - und auch aufgrund der Ergebnisse der Analysen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins - mit anderen Containertypen erforderlich ist. Begrenzend bleibt in jedem Fall die für das betreffende Radionuklid zulässige Masse im Querschnitt der Einlagerungskammer.

Seien n_1 bzw. n_2 die Anzahl der Behälter gleichen Typs mit Summenwert S_1 bzw. S_2 . Außerdem gelte $n = n_1 + n_2$.

Dann ist der anzahlgewichtete Summenwert gegeben durch:

$$S_Q = \frac{n_1}{n} * S_1 + \frac{n_2}{n} * S_2 < 1 \quad . \quad (4.2)$$

Das Verhältnis

$$v = \frac{n_1}{n} \quad (4.3)$$

wird als Verdünnungsverhältnis bezeichnet.

Falls die Summenwerte S_1 größer als 1 und S_2 kleiner als 1 sind, ist die Bedingung

$$S_Q < 1 \quad (4.4)$$

gleichwertig mit

$$v < \frac{1-S_2}{S_1-S_2} \quad (4.5)$$

Das Verdünnungsverhältnis darf diese Schranke nicht erreichen oder überschreiten. Andererseits ist das Verdünnungsverhältnis auch nach unten beschränkt, es kann nicht kleiner als $1/n$ werden, wenn n die Anzahl der Abfallgebinde im Streckenquerschnitt ist. Aus dieser Bedingung folgt, daß nicht Abfallgebinde mit beliebig hohem Summenwert eingelagert werden können. Die maximalen Summenwerte werden weiter begrenzt durch die Anforderungen einer maximal zulässigen Masse an spaltbaren Stoffen aus den Analysen zur Betriebsphase, die in Tabelle 10 aufgeführt sind.

Die Verhältniszahlen zwischen zulässiger Masse unter Berücksichtigung der Anzahl von Abfallgebinden im Querschnitt der Einlagerungskammer und der maximal zulässigen Masse aus den Analysen zur Betriebsphase sind bei den einzelnen Radionukliden sehr unterschiedlich.

Um die Mischung von Abfallgebinden handhabbar zu machen, müssen einheitliche Faktoren für alle Radionuklide gewählt werden. Das führt insbesondere für niedrig angereichertes U-233 und U-235 zu einer Reduzierung der zulässigen Massen, wie sie in Tabelle 15 genannt sind, insbesondere für zylindrische Behälter.

Damit ergeben sich die in Tabelle 16 aufgeführten zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen, die in dieser Form auch in die Endlagerungsbedingungen /20/ einfließen. Die Massenbegrenzungen für Uran gelten dabei nicht für Natururan und abgereichertes Uran.

Dieses nuklidspezifische Anforderungssystem für die Kritikalitätssicherheit ist in Analogie zu den Anforderungen aus den Störfallanalysen und den Analysen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins entwickelt worden, nur im Fall der Kritikalitätssicherheit für einige wenige Radionuklide. Das System der

unterschiedlichen Anforderungen, bei denen letztendlich die restriktivste aus den einzelnen Anforderungsbereichen greift, hat sich trotz seiner Komplexität als praktikabel erwiesen.

Die maximalen Summenwerte werden bei der Verdünnung im Querschnitt wie folgt festgelegt:

- 2 für Container Typ I, II und VI,
- 4 für Betonbehälter Typ I und II sowie für Gußbehälter Typ II, II* und III,
- 7 für Gußbehälter Typ I,

wobei diese Faktoren immer noch sicherstellen, daß die in Tabelle 10 aufgeführten Massen nicht überschritten werden.

Der Summenwert für die Container Typ III, IV und V kann bei der gemischten Einlagerung nicht erhöht werden, die zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen pro Abfallgebinde sind bereits ausgeschöpft.

Diese erhöhten zulässigen Massen können ebenfalls nur im Rahmen der Mischungen von Abfallgebinden ausgeschöpft werden, da die maximale Anzahl der entsprechenden Abfallgebinde im Querschnitt einer Einlagerungskammer berücksichtigt werden muß und die zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer nicht überschritten werden dürfen.

Die maximal zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer sind der Übersichtlichkeit halber in Tabelle 17 zusammenfassend angegeben worden.

5 Festlegung der Aktivitätsgrenzwerte

Bei Aussagen über die Kritikalitätssicherheit ist es üblich, die zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen zugrunde zu legen bzw. aufgrund der gewählten Randbedingungen zu berechnen.

Die zulässigen Massen pro Abfallgebinde sind in Tabelle 16 aufgeführt. Dabei werden die standardisierten Behälter zugrunde gelegt, da ein Kriterium für die Festlegung der zulässigen Massen die Anzahl der im Querschnitt eingelagerten Abfallgebinde ist.

Das Anforderungskonzept, das für das Endlager Konrad entwickelt worden ist, umfaßt neben allgemeinen Anforderungen an Abfallgebinde Anforderungen an das Abfallprodukt, die Verpackungen der radioaktiven Abfälle und zulässige Aktivitäten. Es ist daher unter dem Gesichtspunkt einer einheitlichen Vorgehensweise sinnvoll, auch bei den Anforderungen aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit einen Bezug auf zulässige Aktivitäten herzustellen. In den Endlagerungsbedingungen /20/ werden der Vollständigkeit halber aber neben den zulässigen Aktivitäten auch die zulässigen Massen an spaltbaren Stoffen aufgeführt.

Die in Kap. 4.1 abgeleiteten Massenbegrenzungen können dazu mit Hilfe der spezifischen Aktivität pro Gramm (s. Tabelle 18) direkt in Aktivitätsgrenzwerte umgerechnet werden. Die spezifischen Aktivitäten sind dem Programm KORIGEN /19/ entnommen worden.

Der Summenwert für ein Radionuklidgemisch wird dann mit Hilfe der Formel

$$S_K(B) = \sum_i \frac{A_i}{G_i(B,a)} < 1 \quad (5.1)$$

berechnet. Dabei sind:

S_K	Summenwert (K = Index für Kritikalität)
A_i	Aktivität des Radionuklids i im Abfallgebinde
$G_i(B,a)$	Aus Kritikalitätsrechnungen für den Behälter B und ggf. für den Anreicherungsgrad a ermittelter Aktivitätswert des Radionuklids i.

Die zulässigen Aktivitätswerte pro Abfallgebinde, die sich aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit ergeben, sind in Tabelle 19 angegeben. Die Aktivitätsbegrenzungen für Uran gelten dabei nicht für Natururan und abgereichertes Uran.

Die in Kap. 3.3 aufgeführten höheren spaltbaren Aktiniden sind in der Summenformel (5.1) aufgrund der geringen zulässigen Aktivitäten nicht zu berücksichtigen. Die zulässigen Aktivitäten sind in Tab. 20 aufgeführt.

Vom TÜV Hannover wurde bez. des Radionuklids U-233 der Vorschlag gemacht, zur Vereinfachung der Endlagerungsbedingungen /20/ einen festen Grenzwert für U-233 von 15 g (entsprechend $5,4 \cdot 10^9$ Bq) einzuführen und dann dieses Radionuklid aus der Summenformel herauszunehmen. Diesem Vorschlag wird nicht gefolgt, da U-233 auch ein relevantes Radionuklid in anderen Teilen der Sicherheitsanalyse ist. So liegen zulässige Aktivitätswerte aus den Analysen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins sogar um den Faktor 2 bis 5 unterhalb der in Tabelle 16 für niedrig angereichertes U-233 angegebenen Aktivitätswertes, im Fall des Gußbehälters Typ I mit $5,7 \cdot 10^9$ Bq sogar sehr nahe an dem vom TÜV Hannover vorgeschlagenen Wert. Da das Radionuklid somit ohnehin spezifiziert werden muß, ist die Berücksichtigung von U-233 im Rahmen der Summenformel auch in der Kritikalitätssicherheit sinnvoll.

Im Rahmen der Mischung von Abfallgebänden bleiben die in Kap. 4 genannten Faktoren bestehen. Diese Faktoren sind - in Analogie zur Vorgehensweise bei der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins - nicht in die Endlagerungsbedingungen /20/ aufgenommen worden, da die Überprüfung der Mischungsmöglichkeit mit Abfällen ggf. auch anderer Ablieferungspflichtigen nur dem Endlagerbetreiber möglich ist. Insbesondere besteht im Hinblick auf die gemischte Einlagerung kein Anspruch auf Annahme eines Abfallgebändes, das die Aktivitätswerte gemäß Tabelle 19 überschreitet.

Bei der Anwendung des Summenkriteriums gilt:

- Übersteigt die Aktivität eines Radionuklids 1 % des zugehörigen Aktivitätswertes, ist diese Aktivität anzugeben und bei der Anwendung des Summenkriteriums zu berücksichtigen.
- Bei Unterschreitung des 1 %-Wertes muß die Aktivität des betreffenden Radionuklids weder angegeben noch bei der Anwendung des Summenkriteriums berücksichtigt werden.

Die Angabe der Aktivität oberhalb von 1 % des Aktivitätswertes ist ausreichend, da maximal das siebenfache des Summenwertes für ein Radionuklidgemisch in einem Abfallgebinde ausgeschöpft werden kann.

Eine Korrektur der Aktivitätswerte pro Abfallgebinde infolge der Einführung des Meldewertes von 1 % ist aufgrund der Konservativitäten in den Rechnungen nicht erforderlich.

Der eingeführte Meldewert dient insbesondere dazu, daß geringfügige Aktivitäten nicht explizit aufgeführt werden müssen; ein solcher Meldewert existiert z. B. auch für die Aktivitätswerte aus den Störfallanalysen und aus den Analysen zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins. Der Meldewert soll nicht kernbrennstoffhaltige Abfälle von anderen radioaktiven Abfällen unterscheiden; aus Endlagersicht

ist eine solche Unterscheidung nicht von Bedeutung und wird daher auch nicht durch einen besonderen Grenzwert berücksichtigt.

Bei der Bilanzierung im Endlager Konrad ist im Hinblick auf die Mischung von Abfallgebinden im Querschnitt einer Einlagerungskammer zu beachten, daß der 1 %-Wert bei der Bilanzierung in den Fällen angesetzt wird, in denen keine Aktivitäten angegeben sind.

Die Bilanzierung und die darauf aufbauende Einlagerungsstrategie stellen sicher, daß die Anforderungen an die maximal zulässige Aktivität der Radionuklide U-233, U-235, Pu-239, Pu-241 bzw. an die maximal zulässige Aktivität eines Gemisches an den genannten Radionukliden im Querschnitt einer Einlagerungskammer eingehalten werden.

Generell gilt - wie auch in anderen Bereichen des Anforderungskonzeptes - , daß die Begrenzungen der Massen- bzw. Aktivitätskonzentration im Abfallprodukt und der zulässigen Masse bzw. Aktivität spaltbarer Stoffe im Abfallgebinde jeweils einzeln eingehalten werden müssen und die restriktivste Anforderung zu erfüllen ist. So ist im Fall von UO_2 mit auf 5 % angereichertem Uran z. B. beim Gußbehälter Typ I das Kriterium der Massen- bzw. Aktivitätskonzentration, beim Container Typ V die Anforderung der Massen- bzw. Aktivitätsbegrenzung pro Abfallgebinde einschränkender, wenn das Abfallprodukt direkt in den Container eingebracht wird. Anderenfalls ist aufgrund der Grundanforderung von maximal 50 g an spaltbaren Stoffen pro 100 l Abfallprodukt im Faß die Begrenzung der Massen- bzw. Aktivitätskonzentration restriktiver.

6 Literaturverzeichnis

- /1/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz),
in: Atomgesetz mit Verordnungen, 19. Auflage, Nomos Verl.-Ges., Baden-Baden, 1995.
- /2/ Ridder, Gefahrgut-Handbuch,
Anlage A zur GGVS/zum ADR, 22. Erg. Lfg. 8/85.
- /3/ "nicht besetzt"
- /4/ "nicht besetzt"
- /5/ "nicht besetzt"
- /6/ "nicht besetzt"
- /7/ "nicht besetzt"
- /8/ "nicht besetzt"
- /9/ "nicht besetzt"
- /10/ "nicht besetzt"
- /11/ Migrationsuntersuchungen im Bereich der Schachanlage Konrad, nebst Probennahme, Institut für Angewandte Geologie der FU Berlin, I. Halbjahresbericht 1984.
- /12/ V. W. Schneider, F. W. Ledebrock:
Behandlung von Abfällen bei der MOX-Brennelementefabrikation,
in: Anforderungen an radioaktive Abfälle für das Endlager Konrad und Produktkontrolle,
Vorträge des 62. PTB- Seminars am 29.10.1985,
PTB-Bericht SE-8, S. 3 - 18, Braunschweig, April 1986.
- /13/ G. Kindleben:
Kritikalitätssicherheit,
KTG-Seminar Band 3, Köln 1986.
- /14/ W. Heinicke, H. Krug, W. Thomas, W. Weber, B. Gmal:
Handbuch zur Kritikalität,
GRS Garching, Dezember 1985

/15/ "nicht besetzt"

/16/ "nicht besetzt"

/17/ "nicht besetzt"

/18/ "nicht besetzt"

/19/ U. Fischer, H. W. Wiese:

Verbesserte konsistente Berechnung des nuklearen Inventars abgebrannter DWR- Brennstoffe auf der Basis von Zell-Abbrand-Verfahren mit KORIGEN, KfK-Bericht 3014, Karlsruhe 1983.

/20/ Bundesamt für Strahlenschutz:

Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen) - Schachtanlage Konrad, EU 117, BFS-KZL: 9K/212621/D/ED/0235

7 Tabellen

Nr.	Bezeichnung	Außenabmessungen			
		Länge / Durchmesser mm	Breite mm	Höhe mm	Bruttovolumen m ³
1	Betonbehälter Typ I	ø 1060	–	1370 ¹⁾	1,2
2	Betonbehälter Typ II	ø 1060	–	1510 ²⁾	1,3
3	Gußbehälter Typ I	ø 900	–	1150	0,7
4	Gußbehälter Typ II	ø 1060	–	1500 ³⁾	1,3
5	Gußbehälter Typ III	ø 1000	–	1240	1,0
6	Container Typ I	1600	1700	1450 ⁴⁾	3,9
7	Container Typ II	1600	1700	1700	4,6
8	Container Typ III	3000	1700	1700	8,7
9	Container Typ IV	3000	1700	1450 ⁴⁾	7,4
10	Container Typ V	3200	2000	1700	10,9
11	Container Typ VI	1600	2000	1700	5,4

1) Höhe 1370 mm + Lasche von 90 mm = 1460 mm
2) Höhe 1510 mm + Lasche von 90 mm = 1600 mm
3) Höhe 1370 mm beim Typ KfK
4) Stapelhöhe 1400 mm beim Typ KfK

Containerwerkstoffe sind z.B. Stahlblech, armierter Beton oder Gußwerkstoff.

Tabelle 1: Behältergrundtypen für die Verpackung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Behältertyp	Anzahl der Abfallgebinde im Querschnitt der Einlagerungskammer
Betonbehälter: Typ I	29
Typ II	29
Gußbehälter: Typ I	39
Typ II	29
Typ II *	29
Typ III	31
Container: Typ I	12
Typ II	11
Typ III	5
Typ IV	6
Typ V	5
Typ VI	10

Tabelle 2: Anzahl der Abfallgebinde im Querschnitt einer Einlagerungskammer, aufgeschlüsselt nach Behältertypen

* Typ KfK (s. Tab. 1)

Radionuklid	Masse g	Aktivität Bq
Pu-241	33	$1,3 \cdot 10^{14}$
Pu-238	4,5	$2,9 \cdot 10^{12}$
Pu-239	175,8	$4,0 \cdot 10^{11}$
Pu-240	71,4	$6,0 \cdot 10^{11}$
Pu-242	14,4	$2,0 \cdot 10^9$
Am-241	0,9	$1,2 \cdot 10^{11}$

Tabelle 3: Radionuklidvektor für einen radioaktiven Abfall im Container Typ VI nach /12/

Behältertyp	Zulässige Masse in g bei einem Anreicherungsgrad von	
	≤ 5 % U-233	> 5 % U-233
Betonbehälter:		
Typ I	$1,4 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^1$
Typ II	$1,4 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^1$
Gußbehälter:		
Typ I	$1,0 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^1$
Typ II	$1,4 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^1$
Typ II *	$1,4 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^1$
Typ III	$1,3 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^1$
Container:		
Typ I	$3,3 \cdot 10^2$	$9,1 \cdot 10^1$
Typ II	$3,6 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$
Typ III	$8,0 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^2$
Typ IV	$6,6 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$
Typ V	$8,0 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^2$
TypVI	$4,0 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^2$

Tabelle 4: Massenbegrenzung für U-233 aus den Rechnungen zur Nachbetriebsphase, aufgeschlüsselt auf verschiedene Behältertypen

Behältertyp	Zulässige Masse in g bei einem Anreicherungsgrad von	
	≤ 5 % U-235	> 5 % U-235
Betonbehälter:		
Typ I	$4,5 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^1$
Typ II	$4,5 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^1$
Gußbehälter:		
Typ I	$3,3 \cdot 10^2$	$5,1 \cdot 10^1$
Typ II	$4,5 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^1$
Typ II *	$4,5 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^1$
Typ III	$4,2 \cdot 10^2$	$6,5 \cdot 10^1$
Container:		
Typ I	$1,0 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^2$
Typ II	$1,1 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^2$
Typ III	$2,6 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^2$
Typ IV	$2,1 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^2$
Typ V	$2,6 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^2$
TypVI	$1,3 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^2$

Tabelle 5: Massenbegrenzung für U-235 aus den Rechnungen zur Nachbetriebsphase, aufgeschlüsselt auf verschiedene Behältertypen

Behältertyp	Zulässige Masse in g
Betonbehälter:	
Typ I	$3,8 \cdot 10^1$
Typ II	$3,8 \cdot 10^1$
Gußbehälter:	
Typ I	$2,8 \cdot 10^1$
Typ II	$3,8 \cdot 10^1$
Typ II *	$3,8 \cdot 10^1$
Typ III	$3,5 \cdot 10^1$
Container:	
Typ I	$9,1 \cdot 10^1$
Typ II	$1,0 \cdot 10^2$
Typ III	$2,2 \cdot 10^2$
Typ IV	$1,8 \cdot 10^2$
Typ V	$2,2 \cdot 10^2$
TypVI	$1,1 \cdot 10^2$

Tabelle 6: Massenbegrenzung für Pu-239 aus den Rechnungen zur Nachbetriebsphase, aufgeschlüsselt auf verschiedene Behältertypen

Behältertyp	Zulässige Masse in g
Betonbehälter:	
Typ I	$1,9 \cdot 10^1$
Typ II	$1,9 \cdot 10^1$
Gußbehälter:	
Typ I	$1,4 \cdot 10^1$
Typ II	$1,9 \cdot 10^1$
Typ II *	$1,9 \cdot 10^1$
Typ III	$1,7 \cdot 10^1$
Container:	
Typ I	$4,5 \cdot 10^1$
Typ II	$5,0 \cdot 10^1$
Typ III	$1,1 \cdot 10^2$
Typ IV	$0,9 \cdot 10^2$
Typ V	$1,1 \cdot 10^2$
TypVI	$5,5 \cdot 10^1$

Tabelle 7: Massenbegrenzung für Pu-241 aus den Rechnungen zur Nachbetriebsphase, aufgeschlüsselt auf verschiedene Behältertypen

Tabelle 8: entfällt

Tabelle 9: entfällt

Radionuklid	Anreicherungsgrad	zulässige Massen
U-233	$\leq 5\%$	500
U-233	$> 5\%$	240
U-235	$\leq 5\%$	850
U-235	$> 5\%$	350
Pu-239	–	230
Pu-241	–	120

Tabelle 10: Maximal zulässige Massen an spaltbaren Stoffen, die sich aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase ergeben (Angaben in g pro Abfallgebinde)

Tabelle 11: entfällt

Radionuklid	Masse g
Np-237	400
Am-241	320
Am-242m	0,26
Am-243	500
Cm-243	1,8
Cm-244	60
Cm-245	0,6
Cm-247	18
Cf-249	0,2
Cf-251	0,1

Tabelle 12: Maximal zulässige Massen pro Abfallgebinde für die genannten höheren spaltbaren Aktiniden, die in die Endlagerungsbedingungen einfließen (s. /20/, S. 55).
Angaben in g pro Abfallgebinde.

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Aktivität [Bq]
H-3	$6,0 \cdot 10^{17}$
C-14	$4,0 \cdot 10^{14}$
I-129	$7,0 \cdot 10^{11}$
Ra-226	$4,0 \cdot 10^{12}$
Th-232	$5,0 \cdot 10^{11}$
U-235	$2,0 \cdot 10^{11}$
U-236	$1,0 \cdot 10^{12}$
U-238	$1,9 \cdot 10^{12}$
Pu-239	$2,0 \cdot 10^{15}$
Pu-241	$2,0 \cdot 10^{17}$
Gesamt - Alphastrahler	$1,5 \cdot 10^{17}$
Gesamt - Beta- / Gamma- strahler	$5,0 \cdot 10^{18}$

Tabelle 13: Aktivitäten relevanter Radionuklide und Radionuklidgruppen am Ende der Betriebsphase gemäß den Endlagerungsbedingungen (s. /20/, S. 51)

Material	zulässige Masse
D ₂ O	275
Beryllium	360
Graphit	420

Tabelle 14: Zulässige Massen für Materialien mit besonderen Moderator- und Reflektoreigenschaften.
(Angabe in kg pro Abfallgebinde)

Behälter	Anreicherungsgrad				Pu-239	Pu-241
	U-233		U-235			
	≤ 5%	> 5%	≤ 5%	> 5%		

Beton-behälter						
Typ I	140	38	450	69	38	19
Typ II	140	38	450	69	38	19

Guß-Behälter						
Typ I	100	28	330	50	28	14
Typ II	140	38	450	69	38	19
Typ II *	140	38	450	69	38	19
Typ III	130	35	420	65	35	17

Containe r						
Typ I	330	90	850	170	90	45
Typ II	360	100	850	180	100	50
Typ III	500	220	850	350	220	110
Typ IV	500	180	850	330	180	90
Typ V	500	220	850	350	220	110
Typ VI	400	110	850	200	110	55

Tabelle 15: Zulässige Massen an spaltbaren Stoffen, die sich aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit ergeben (Angaben in g pro Abfallgebinde)

Behälter	Anreicherungsgrad				Pu-239	Pu-241
	U-233		U-235			
	≤ 5%	> 5%	≤ 5%	> 5%		

Beton-behälter						
Typ I	125	38	210	69	38	19
Typ II	125	38	210	69	38	19

Guß-Behälter						
Typ I	70	28	120	50	28	14
Typ II	125	38	210	69	38	19
Typ II*	125	38	210	69	38	19
Typ III	125	35	210	65	35	17

Containere						
Typ I	250	90	425	170	90	45
Typ II	250	100	425	175	100	50
Typ III	500	220	850	350	220	110
Typ IV	500	180	850	330	180	90
Typ V	500	220	850	350	220	110
Typ VI	250	110	425	175	110	55

Tabelle 16: Zulässige Massen an spaltbaren Stoffen, die aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit resultieren und in die Endlagerbedingungen /20/ einfließen (Angaben in g pro Abfallgebinde)

Radionuklid	Anreicherungsgrad	zulässige Masse in kg
U-233	$\leq 5 \%$	4,0
U-233	$> 5 \%$	1,1
U-235	$\leq 5 \%$	13,0
U-235	$> 5 \%$	2,0
Pu-239	–	1,1
Pu-241	–	0,55

Tabelle 17: Maximal zulässige Massen an spaltbaren Stoffen im Querschnitt einer Einlagerungskammer, die sich aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase ergeben

Radionuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]
U-233	$3,6 \cdot 10^8$
U-235	$8,0 \cdot 10^4$
Pu-239	$2,3 \cdot 10^9$
Pu-241	$3,8 \cdot 10^{12}$

Tabelle 18: Spezifische Aktivitäten der Radionuklide U-233, U-235, Pu-239, Pu-241

Behälter	Anreicherungsgrad				Pu-239	Pu-241
	U-233		U-235			
	≤ 5%	> 5%	≤ 5%	> 5%		

Beton-behälter						
Typ I	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{13}$
Typ II	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{13}$

Guß-Behälter						
Typ I	$2,5 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$9,6 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^{10}$	$5,3 \cdot 10^{13}$
Typ II	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{13}$
Typ II*	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{13}$
Typ III	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^6$	$8,0 \cdot 10^{10}$	$6,4 \cdot 10^{13}$

Containe r						
Typ I	$9,0 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{14}$
Typ II	$9,0 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{14}$
Typ III	$1,8 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	$6,8 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^{14}$
Typ IV	$1,8 \cdot 10^{11}$	$6,4 \cdot 10^{10}$	$6,8 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^{11}$	$3,4 \cdot 10^{14}$
Typ V	$1,8 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	$6,8 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^{14}$
Typ VI	$9,0 \cdot 10^{10}$	$3,9 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{14}$

Tabelle 19: Zulässige Aktivitätswerte für spaltbare Stoffe, die sich aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit ergeben (Angaben in Bq pro Abfallgebinde)

Radionuklid	Aktivität Bq
Np-237	$1,0 \cdot 10^{10}$
Am-241	$4,0 \cdot 10^{13}$
Am-242m	$9,3 \cdot 10^{10}$
Am-243	$3,6 \cdot 10^{12}$
Cm-243	$3,4 \cdot 10^{12}$
Cm-244	$1,7 \cdot 10^{14}$
Cm-245	$3,8 \cdot 10^9$
Cm-247	$6,1 \cdot 10^7$
Cf-249	$3,0 \cdot 10^{10}$
Cf-251	$5,8 \cdot 10^9$

Tabelle 20: Zulässige Aktivitätswerte pro Abfallgebinde für die genannten höheren spaltbaren Aktiniden (Angaben in Bq pro Abfallgebinde)

Tabelle 21: entfällt

7 Anhang

Aufgrund der vorgesehenen Einlagerungs- und Pufferungsstrategie im geplanten Endlager Konrad ist als mögliche Konfiguration von Abfallgebinden in der Pufferhalle im ungünstigsten Fall eine zum Teil zweilagige Anordnung von bis zu 258 Transporteinheiten zu unterstellen. (Die untere Lage besteht aus maximal 154 (s. Abb. 3, Variante 2), die obere aus maximal 104 Transporteinheiten.) Dazu ist anzumerken, daß die maximale Belegung mit 258 Transporteinheiten in der Pufferhalle nur für den Fall einer innerbetrieblichen Störung vorgesehen ist und in der Praxis nicht damit zu rechnen ist, daß alle gepufferten Abfallgebinde die in der Rechnung unterstellte Massenkonzentration spaltbarer Stoffe im Abfallprodukt ausschöpfen.

In einer Kritikalitätsrechnung hierzu wurde eine in zwei Dimensionen infinite, zweistöckige Containerlagerung berechnet. Ausgehend von einer Begrenzung der Massenkonzentration auf 50 g an spaltbaren Stoffen pro 100 l Abfallprodukt sind verschiedene Modelle der Spaltstoffverteilung in einem Container des Typs III berechnet worden. Hierbei hat sich eine kugelförmige Verteilung von 50 g Pu-239 je 100 l Würfelvolumen bei optimaler Wassermoderation als reaktivste Konfiguration erwiesen. Die im Rechenmodell verwendete Unterteilung in 112 würfelförmige Volumina ist aus Abb. A1 zu ersehen. Als Bodenreflektor wurden 50 cm Beton, als Deckenreflektor volle Wasserreflektion angesetzt (s. Abb. A2). Die Dichte des Moderators zwischen den kugelförmigen Spaltstoffzonen wurde in verschiedenen Rechenläufen variiert. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Rechnungen (SCALE 27 Gruppen Wirkungsquerschnitte, KENO 4) sind in Tabelle A1 dargestellt. Die berechneten k-Werte liegen in allen Fällen unterhalb von 0,8.

Das verwendete Rechenmodell deckt auch mögliche Konfigurationen von anderen Abfallgebinden in der Pufferhalle ab. Bei Beton- und Gußbehältern gilt ebenfalls die Konzentrationsbegrenzung von 50 g Spaltstoff pro 100 l Abfallprodukt. Wegen der kleineren Behältervolumina und der größeren Wändicken (ca. 15 cm Beton bzw. 3 cm Guß) ist eine stärkere Separation der Spaltstoffmengen in den einzelnen Abfallgebinden gegeben als im Containermodell, so daß hier noch niedrigere k-Werte zu erwarten sind.

Zwischenmoderation [g/cm ³]	k _{eff}	1 sigma
1,0	0,507	0,003
0,6	0,449	0,003
0,3	0,401	0,003
0,0001	0,750	0,003

Tabelle A1: Ergebnisse der Monte-Carlo-Rechnungen am Containermodell

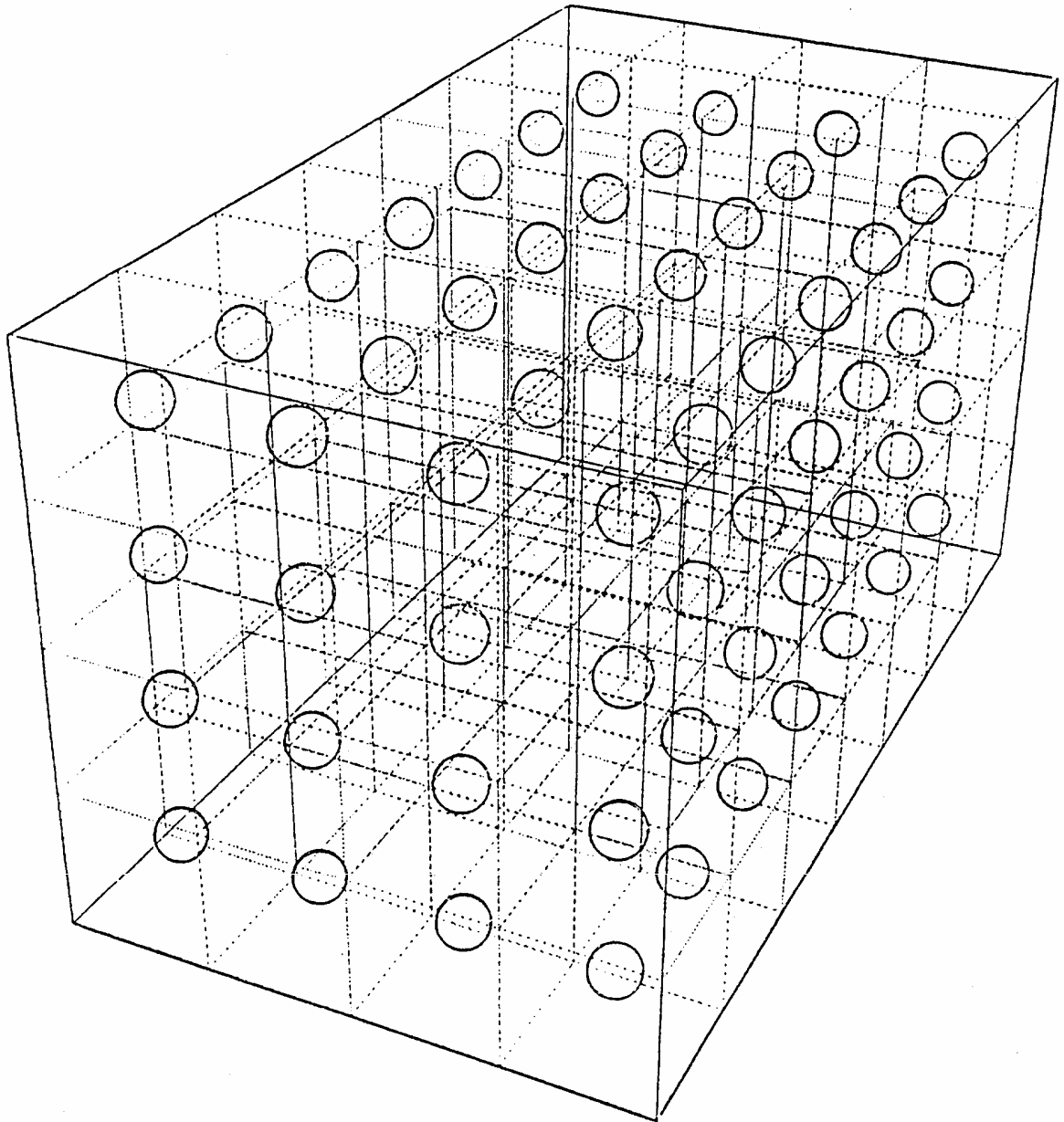
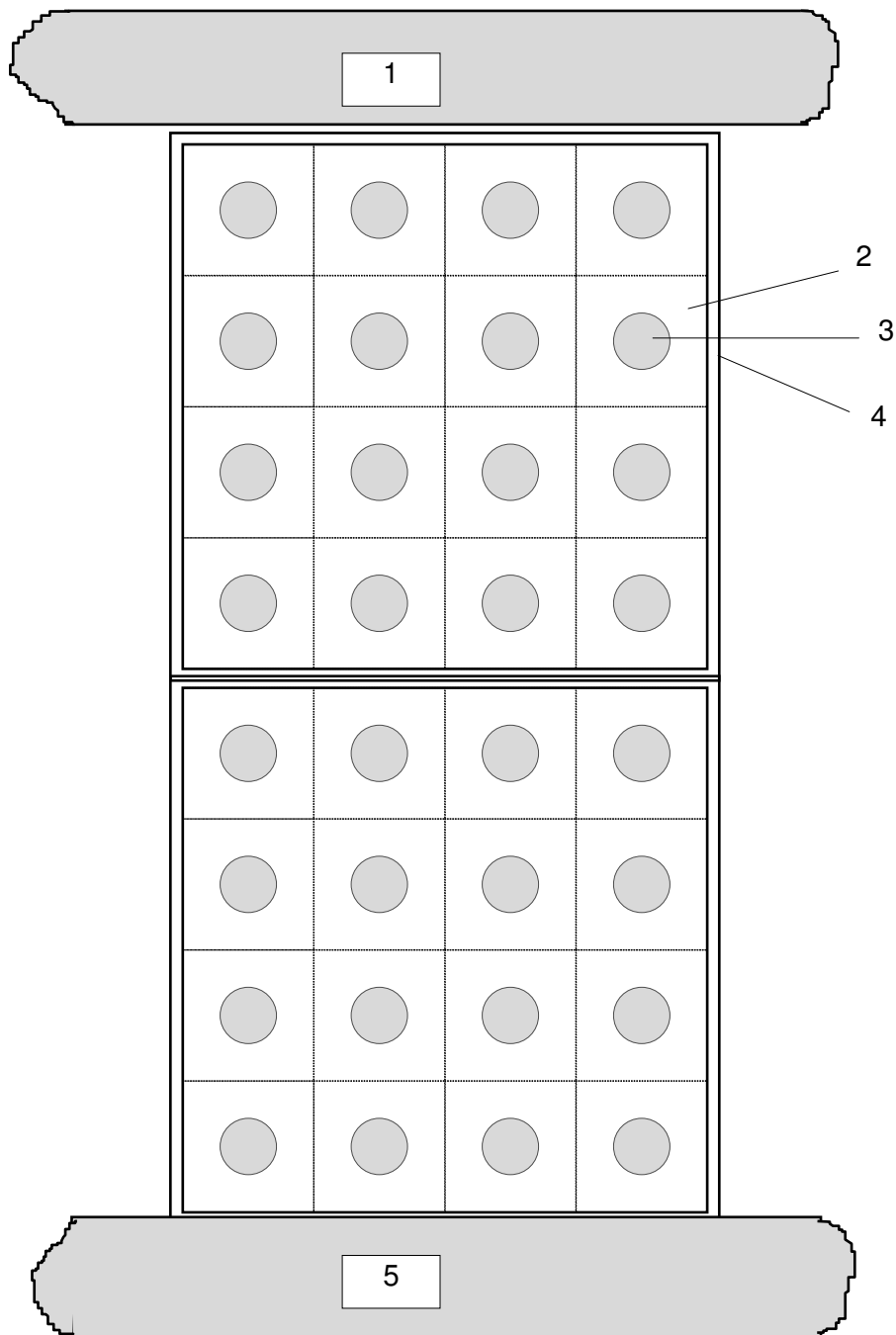


Abb. A1: Rechenmodell für die Spaltstoffverteilung in einem Container Typ III



- 1 Deckenreflektor 30 cm Wasser
- 2 Zwischenmoderator Wasser, variable Dichte
- 3 $\text{PuO}_2 / \text{H}_2\text{O}$ - Gemisch, 30 g Pu-239 pro Liter
- 4 Containerwandung, 3 mm Stahl
- 5 Bodenreflektor, 50 cm Beton
an den übrigen Seiten reflektive Randbedingungen

Abb. A2: Rechenmodell der Konfiguration von zweilagig gestapelten Abfallgebinden in der Pufferhalle