



## DECKBLATT

EU 085.2	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
	9K	33219	-	E	RB	0003	02

<b>Titel der Unterlage:</b> Systemanalyse Konrad, Teil 3: Kritikalitätsrechnungen zur Massen- und Konzentrationsbegrenzung für Spaltstoffreste in Abfallgebinden Rev. 02 - GRS-A-1302	<b>Seite:</b> I.
	<b>Stand:</b> 26.08.88

<b>Ersteller:</b> GRS	<b>Textnummer:</b>
--------------------------	--------------------

**Stempelfeld:**

PSP-Element TP.....9K/21274	zu Plan-Kapitel: 3.7
-----------------------------	----------------------

	PL	PL
		13.09.88 
		Freigabe im Projekt

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



# REVISIONSBLATT

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9K	05219					E	RE	0003	22

Titel der Unterlage:

Systemanalyse Konrad - Teil 3 -

Kritikalitätsrechnungen zur Massen- und Konzentrationsbegrenzung für Spaltstoffreste in Abfallgebinden


GRS-A-1302, November 1986

*fol. Nr. 85.2*

Seite 1

Stand

*26.8.88*

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
2	26.8.88	SE 1.1		5	R	

\*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur

Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung

Kategorie S = substantielle Änderung

Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

SYSTEMANALYSE KONRAD, TEIL 3  
KRITIKALITÄTSRECHNUNGEN ZUR  
MASSEN- UND KONZENTRATIONSBEGRENZUNG  
FÜR SPALTSTOFFRESTE IN ABFALLGEBINDEN

GRS-A- 1302

(November 1986)

Auftragsnummer: 41373



Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) erstellt worden. Der Eigentümer behält sich alle Rechte vor.

Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des Auftraggebers zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Vorbemerkung	3
2. Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase	4
2.1 Randbedingungen und Rechenannahmen	4
2.2 Ergebnisse	5
2.2.1 Spaltstoff Uran	5
2.2.2 Spaltstoff Plutonium	8
3. Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase	11
3.1 Konzentrationsbegrenzung	11
3.2 Massenbegrenzung	14
4. Zusammenfassung	16
5. Unterlagenverzeichnis	18
6. Abbildungen	19

## 1. VORBEMERKUNG

Die Endlagerungsbedingungen, die von den für das Endlager KONRAD vorgesehenen radioaktiven Abfällen eingehalten werden müssen, enthalten u.a. Spezifikationen der zulässigen Masse und Konzentration an Spaltstoff je Transporteinheit oder Abfallgebände. Ein Kriterium für die Festsetzung dieser Werte ist die Kritikalitätssicherheit im Einlagerungsbetrieb und in der Nachbetriebsphase. Die PTB als zukünftiger Betreiber des Endlagers hat die GRS beauftragt, hierzu nach vorgegebenen Randbedingungen Kritikalitätsberechnungen durchzuführen /1/. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse sind als Ergänzung einer bereits vorliegenden Analyse zur Kritikalitätssicherheit /2, 3/ zu sehen. Als Störfallszenario der Nachbetriebsphase wird für einen hinreichend langen Betrachtungszeitraum ein Auslaugen des gesamten Spaltstoffes aus der Abfallgebändematrix durch Wasser unterstellt. In der Folge kommt es dann im Bereich einer Einlagerungsstrecke zu einer lokalen Ansammlung und Aufkonzentration dieser Spaltstofflösung. Diese Annahme ist ein hypothetischer Störfall, da hierbei ein selektives Herauslösen der spaltbaren Radionuklide aus der Gebändematrix unterstellt wird. Vorliegende Erkenntnisse über den tatsächlichen Ablauf solcher Korrosionsvorgänge werden dabei nicht berücksichtigt. Die in Betracht kommenden Konzentrations- bzw. Massengrenzwerte liegen im Mittel für ein einzelnes Abfallgebände noch weit unterhalb der kritikalitätsrelevanten Größenordnung. Hierzu sind ergänzende Rechnungen (in Kugel- und Schichtgeometrie) durchgeführt worden. Da jedoch eine gleichmäßige Verteilung der spaltstoffhaltigen Abfälle über alle in einem Kammerquerschnitt eingelagerten Abfallgebände nicht gefordert wird, sind auch kritikalitätssichere Grenzwerte für die zulässige Spaltstoffmasse und Konzentration in einem einzelnen Abfallgebände abzuleiten.

Dieser Bericht ergänzt die bereits vorliegenden Analysen zur Kritikalitätssicherheit hinsichtlich Konzentrations- und Massenbegrenzung für Spaltstoff in einem einzelnen Abfallgebände. Dabei wird neben der Nachbetriebsphase auch die Betriebsphase in die Sicherheitsbetrachtung einbezogen. Als Randbedingung dazu wird von einer begrenzten Anzahl von Abfallgebänden ausgegangen, die zur Zwischenlagerung in einer Pufferhalle gestapelt sind. Die genauen Randbedingungen und Ergebnisse werden im folgenden dargestellt.

## 2. KRITIKALITÄTSSICHERHEIT IN DER NACHBETRIEBSPHASE

### 2.1 Randbedingungen und Rechenannahmen

Es wird angenommen, daß die spaltbaren Reststoffe in den Abfallgebinden als Oxide ( $\text{UO}_2$  und  $\text{PuO}_2$ ) vorliegen. Wie eingangs beschrieben, wird für die Sicherheitsanalyse der Nachbetriebsphase eine durch Salzlösung verursachte Korrosion des Abfallgebindematrix und ein vollständiges Lösen der darin enthaltenden Spaltstoffreste angenommen. Der Salzgehalt der Lösung wurde nach vorliegenden Analysenergebnissen für Grubenwasser aus dem Bereich der Schachanlage Konrad angesetzt /4/. Der neutronenphysikalisch wirksame Chloridanteil im Salz beträgt 96 g Cl pro Liter. Der Spaltstoff wird als gleichmäßig verteilt in der Salzlösung angenommen. Zum weiteren Ablauf des Szenarios sind zwei Modelle näher untersucht worden:

#### Kugelförmige Spaltstoffzone:

Bei der hier unterstellten lokalen Ansammlung und Aufkonzentration von Spaltstofflösung wird das gesamte Spaltstoffinventar von 10 Containern des Typs V mit je 10 200 l-Fässern zugrundegelegt. Dabei wird konservativ Kugelgeometrie mit einem 30 cm dicken Reflektor aus Normalbeton gerechnet.

Da die kritische Masse stark von der Spaltstoffkonzentration im Wasser abhängt, wurden die kleinsten kritischen Kugelradien bei verschiedenen Spaltstoffkonzentrationen berechnet. Der Salzanteil im Wasser ist dabei konstant gehalten worden.

#### Schichtförmige Verteilung

Ein zweites Rechenmodell beruht auf der Annahme, daß die Spaltstofflösung als gleichmäßige Schicht über dem Boden einer Einlagerungsstrecke stehen bleibt. Hierzu sind kritische Schichtdicken in Abhängigkeit von der Spaltstoffkonzentration bei konstantem Salzgehalt berechnet worden. Die Rechnungen liefern als Ergebnis die kritische Schichtdicke einer zweidimensional infiniten Schicht. Damit läßt sich für eine Einlagerungsstrecke mit bekannten Abmessungen und bei bekannter Anzahl der

eingelagerten Abfallgebinde aus dem gemittelten Spaltstoffanteil ein Grenzwert für das einzelne Abfallgebinde ableiten.

Sämtliche Kritikalitätsrechnungen sind mit dem Programmsystem SCALE durchgeführt worden /5/. Dabei ist der Transportcode XSRNPM und der Monte Carlo Code KENO mit den Wirkungsquerschnitten der 27-Gruppen-Bibliothek eingesetzt worden.

## 2.2 Ergebnisse

### 2.2.1 Spaltstoff Uran

#### Rechenmodell in Kugelgeometrie:

Zum Spaltstoff Uran sind Rechnungen für einen niedrigen Anreicherungsgrad (mit Massenanteil 5 % U235) und für einen hohen Anreicherungsgrad (Massenanteil 95 % U235) durchgeführt worden. Die Ergebnisse für niedrig angereichertes Uran sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefaßt. In der Kurvendarstellung (Bild 1) ist die berechnete kritische Kugelmasse über der Spaltstoffdichte aufgetragen. Wie daraus zu ersehen ist, nimmt die kleinste kritische Masse unter den genannten Randbedingungen einen Wert von 263,6 kg Uran an, der bei einer Konzentration von 2,65 g Uran/l erreicht wird. Dieser hohe Wert für die kritische Masse ist bedingt durch den Chloridanteil im Wasser, der in der angesetzten Konzentration deutliche Absorptionsverluste bei thermischen Neutronen verursacht.

Bei der niedrigen Anreicherung ergibt sich daraus für U235 eine Masse von 13,2 kg. Umgerechnet auf 100 Abfallfässer (10 Container mit je 10 200 l-Fässern) liegt dann der kritische Grenzwert bei 130 g U235 pro 200 l Faß.

Für  $\text{UO}_2$  mit hoher Anreicherung sind unter denselben Randbedingungen  $k_{\text{eff}}$ -Berechnungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Sie zeigen, daß die kleinste kritische Masse unter diesen Bedingungen bei 2,1 kg Uran liegt, was umgerechnet auf eine Einlage-

rungscharge von 100 Fässern einem Wert von ca. 20 g U235 pro Faß entspricht.

Tabelle 1:

Ergebnisse der Kritikalitätsrechnungen für niedrig angereichertes Uran (Massenanteil 5 % U235), Chloridanteil im Wasser 96 g/l, Reflektor aus 30 cm Beton.

Urandichte g/cm <sup>3</sup>	Oxiddichte g/cm <sup>3</sup>	Kugelvolumen l	Masse in kg	
			Uran	U235
1,5	1,702	502,15	753,24	37,66
1,75	1,985	230,99	404,24	20,21
2,0	2,269	154,54	309,10	15,45
2,25	2,552	121,96	274,41	13,72
2,5	2,836	105,58	263,95	13,20
2,65	3,006	99,47	263,60	13,18
3,0	3,403	92,11	276,33	13,82
3,5	3,971	91,75	321,14	16,06
4,0	4,538	99,54	398,16	19,91



Tabelle 2:

Ergebnisse der Kritikalitätsrechnungen für hoch angereichertes Uran (Massenanteil 95 % U235), Chloridanteil im Wasser 96 g/l, Reflektor aus 30 cm Beton.

Urandichte g/cm <sup>3</sup>	Oxiddichte g/cm <sup>3</sup>	Kugelvolumen l	Masse in kg	
			Uran	U235
0,05	0,568	1371,90	68,59	65,16
0,10	0,114	27,58	2,76	2,62
0,125	0,142	18,52	2,32	2,20
0,15	0,170	14,45	2,17	2,06
0,20	0,227	10,76	2,15	2,04
0,25	0,284	9,07	2,27	2,15

Rechenmodell in Schichtgeometrie

Daneben ist für  $UO_2$  bei hoher Anreicherung von U235 das Modell einer schichtförmigen Anordnung von Spaltstofflösung berechnet worden (Tabelle 3). Die kritische Dicke einer infiniten Schicht mit beidseitig 30 cm Betonreflektor nimmt mit steigender Spaltstoffkonzentration kontinuierlich ab. Berechnet man daraus für eine verfüllte Einlagerungskammer von 1000 m Länge und 7 m Breite mit insgesamt 23 800 Abfallgebinden (200 l-Fässer in Containern Typ V) die mittlere Spaltstoffmasse pro Faß, so liegt der niedrigste Wert bei 2,5 kg Uran pro Abfallgebinde. Dieser Wert ergibt sich aus dem Minimum in der Flächenkonzentration für Spaltstoff bei einer Schichtdicke von 8,6 cm (Tabelle 3), wenn man annimmt, daß sich die aus den Abfallgebinden ausgelaugten Spaltstoffreste auf dem zugeordneten Flächenanteil der Einlagerungskammer schichtförmig und mit gleichmäßiger Konzentration verteilen. Unter dieser Bedingung ergibt sich ein deutlich höherer Grenzwert für den mittleren Spaltstoffanteil pro Faß als bei einem Ansatz in Kugelgeometrie.

Tabelle 3:

Kritische Schichtdicken für ein homogenes Gemisch aus hochangereichertem  $UO_2$  und Wasser mit Salzanteil, 30 cm Betonreflektor.

Urandichte	Oxiddichte	kritische Schichtdicke	Spaltstoff pro Fläche
g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	cm	g U/cm <sup>2</sup>
0,08	0,091	11,95	0,956
0,1	0,114	8,64	0,864
0,5	0,568	2,93	1,463
0,8	0,909	2,53	2,026
1,0	1,136	2,40	2,400
2,0	2,272	2,07	4,144

### 2.2.2 Spaltstoff Plutonium

In gleicher Weise wie für niedrig- und hochangereichertes Uran sind die Rechenmodelle in Kugel- und Schichtgeometrie zur Abschätzung eines Konzentrationsgrenzwertes für plutoniumhaltige Abfälle angewandt worden. Dabei wird einmal konservativ mit reinem Pu239 und einmal mit einem realistischen Pu-Vektor /3/ mit folgenden Massenanteilen gerechnet: 1 % Pu238, 59 % Pu239, 25 % Pu240, 10 % Pu241, 5 % Pu242.

Tabelle 4 enthält die in zwei Rechenserien ermittelten kritischen Kugelmassen für verschiedene Spaltstoffkonzentrationen in Wasser. Der Salzanteil wird wiederum konstant gehalten ('Hils-Wasser'). Für reines Pu239 erhält man damit einen Mittelwert von 11,3 g pro 200 l-Faß, während für das angesetzte Pu-Isotopengemisch der Wert 51 g Pu beträgt.

Die berechneten kritischen Schichtdicken für Pu239 und für das Isotopengemisch mit 59 % Pu239 sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Daraus ergeben sich bei Mittelung über eine Einlagerungsstrecke von 7000 m<sup>2</sup> Grundfläche und 23 800 200 l-Fässern folgende Mittelwerte für das einzelne Faß: 1,27 kg für 100 % Pu239 und 3,33 kg für den Pu-Vektor.

Tabelle 4:

Kritische Kugelmassen von  $\text{PuO}_2$ , Moderator Salzwasser (Hils-Wasser),  
30 cm Betonreflektor, für zwei verschiedene Pu-Vektoren:

1. 100 % Pu239
2. 59 % Pu239, 25 % Pu240, 10 % Pu241, 5 % Pu242, 1 % Pu238

Pu-Dichte g/cm <sup>3</sup>	Oxiddichte g/cm <sup>3</sup>	kritisches Kugelvolumen l	Masse in kg	
			Pu	Pu239
1. 100 % Pu239				
0,05	0,057	28,40		1,42
0,08	0,091	14,01		1,12
0,10	0,113	11,33		1,13
0,50	0,567	6,90		2,95
0,80	0,907	5,26		4,21
2. 59 % Pu239				
0,05	0,057	604,02	30,20	17,82
0,08	0,091	76,42	6,11	3,61
0,10	0,113	51,03	5,10	3,01
0,20	0,227	28,98	5,80	3,42
0,50	0,567	23,98	11,99	7,07

Tabelle 5:

Kritische Schichtdicken für Gemische von  $\text{PuO}_2$  und Salzwasser ('Hilswasser'), beidseitig 30 cm Betonreflektor, für zwei verschiedene Pu-Vektoren:

1. 100 % Pu239

2. 59 % Pu239, 25 % Pu240, 10 % Pu241, 5 % Pu242, 1 % Pu238

Pu-Dichte	Oxiddichte	kritische Schichtdicke	Spaltstoff pro Fläche
g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	cm	g Pu/cm <sup>2</sup>
1. 100 % Pu239			
0,03	0,034	23,06	0,692
0,05	0,057	8,66	0,433
0,08	0,091	5,46	0,437
0,10	0,113	4,67	0,467
0,15	0,170	3,73	0,560
0,20	0,227	3,30	0,660
2. 59 % Pu239			
0,05	0,057	38,98	1,949
0,10	0,113	11,33	1,133
0,12	0,136	9,84	1,180
0,15	0,170	8,62	1,293
0,20	0,227	7,67	1,533
0,50	0,567	6,34	3,171

### 3. KRITIKALITÄTSSICHERHEIT IN DER BETRIEBSPHASE

In den bisherigen Betrachtungen sind aus Kritikalitätsrechnungen für Spaltstofflösung Grenzwerte für Spaltstoff pro Abfallgebinde berechnet worden, die auf der Annahme einer Gleichverteilung der Spaltstoffreste über alle betrachteten Abfallgebinde beruhen. Nach den vorläufigen Annahmebedingungen für das Endlager ist jedoch eine Ausschöpfung der Grenzwerte bezogen auf alle in einem Kammerquerschnitt gelagerten Abfallgebinde zulässig. Eine gleichmäßige Verteilung der Spaltstoffreste auf alle Abfallgebinde im Kammerquerschnitt wird nicht vorgeschrieben. Daher ist es erforderlich, die Kritikalitätssicherheit einzelner Abfallgebinde zu prüfen und gegebenenfalls Einschränkungen der zulässigen Spaltstoffmasse und Konzentration festzulegen.

#### 3.1 Konzentrationsbegrenzung

Für die Betriebsphase ist die Kritikalitätssicherheit einzelner und mehrerer gestapelter Abfallgebinde maßgebend. Es wird untersucht, ob durch ungünstige Konzentrationsverteilung der Spaltstoffreste innerhalb eines Abfallgebändes oder bei der Stapelung mehrerer Abfallgebinde eine kritische Anordnung entstehen kann. Da bei der gewählten Vorgehensweise im Rahmen eines Anforderungskonzeptes eine genaue Spezifikation der Abfallgebundematrix nicht möglich ist, wird für diese Betrachtung der ungünstigste Fall der optimalen Moderation der Spaltstoffreste durch das übrige Material des Abfallgebändes unterstellt. Damit wird auch die Möglichkeit mit einbezogen, daß z.B. durch schwach absorbierenden und moderierenden Abfallgebindeinhalt eine Neutronenwechselwirkung zwischen räumlich getrennten Zonen mit Spaltstoffresten innerhalb eines oder mehrerer Container auftritt.

Als volumenmäßig größtes Einzelgebinde zur direkten Aufnahme von spaltstoffhaltigen Abfällen ist für die Berechnungen der Container Typ III unterstellt worden. Im Rahmen der Anforderungen an endzulagernde Abfallgebinde soll eine Konzentrationsbeschränkung auf 50 g Spaltstoff je 100 l Abfallprodukt festgesetzt werden. Im Rechenmodell ist dieses Volumen als Würfel der Kantenlänge 46,4 cm angesetzt worden.

Für die Rechnung wird das Containervolumen in einzelne Würfel unterteilt und zentriert in jedem Würfel eine Kugel mit 50 g Spaltstoff angenommen (Bild 2). Es wurde mit  $\text{Pu}^{239}\text{O}_2$  bei optimaler Dichte und Wassermoderation gerechnet, d.h. Spaltstoffdichte 30 g Pu/l, Moderationsverhältnis  $\text{H}/\text{Pu} = 900$ . Für das verbleibende Würfelvolumen ist Wasser angesetzt und dessen Dichte in verschiedenen Rechenläufen zwischen 0,1 und 1,0 g/cm<sup>3</sup> variiert worden. Außerdem ist mit reflektiven Randbedingungen in drei Achsenrichtungen gerechnet worden, was einer Stapelung von acht Containern in zwei Ebenen entspricht. Die Berechnungen sind mit dem Monte Carlo Code KENO und dem Modul CSAS2 des Programmsystems SCALE durchgeführt worden. Wie die Ergebnisse in Tabelle 6 zeigen, liegt der höchste berechnete  $k_{\text{eff}}$ -Wert bei 0,5.

In gleicher Weise sind Kritikalitätsrechnungen für eine schichtweise Spaltstoffverteilung innerhalb eines Containers durchgeführt worden (Bild 3). Die Dicke der Schicht hängt dabei von der angesetzten Pu-Dichte ab und kann aus der o.g. Randbedingung (50 g Pu in einem 100 l-Würfel) berechnet werden. Für dieses Modell liegt der höchste berechnete Wert von  $k_{\text{eff}}$  niedriger als 0,5 (Tabelle 6).

Bei homogener Verteilung des Spaltstoffes über das gesamte Containervolumen unter optimalem Moderationsverhältnis ( $\text{H}/\text{Pu} = 3700$ ) liegt der berechnete Wert von  $k_{\text{eff}}$  bei 0,40.

Als Resümee aus den erhaltenen Rechenergebnissen ist festzustellen, daß bei Einhaltung einer Konzentrationsbegrenzung von 50 g pro 100 l Würfelvolumen für Spaltstoff im Abfallprodukt die Gefahr einer Kritikalität im Einlagerungsbetrieb nicht besteht.

Tabelle 6:

Rechenergebnisse zur Begrenzung der Spaltstoffkonzentration in Abfallgebunden auf 50 g pro 100 l Abfallprodukt bei einem Containervolumen von 8,7 m<sup>3</sup>; Wandstärke 3 mm Stahl, Spaltstoff Pu<sup>239</sup>O<sub>2</sub>, Zwischenmoderator H<sub>2</sub>O.

Spaltstoffverteilung	Zwischenmoderation Dichte in g/cm <sup>3</sup>	k <sub>eff</sub> ± 1 σ
30 g Pu/l, optimal moderiert, als Kugel (1.67 l) in einem 100 l-Würfel zentriert (Abb. 2)	0.1	0,40
	0.3	0.40
	0.6	0.44 0.004
	0.8	0.47
	1.0	0.50
30 g Pu/l, optimal moderiert, vier Schichten a 0,8 cm dick, (Abb. 3)	0.02	0.22
	0.08	0.43
	0.10	0.43 0.003
	0.20	0.35
	0.40	0.26
100 g Pu/l, vier Schichten a 0,24 cm dick	0.2	0.34
	0.4	0.25
	0.6	0.24 0.003
	0.8	0,23
0,5 g Pu/l, homogen im gesamten Container, H/Pu = 3700		0,39 0.002

### 3.2 Massenbegrenzung

Nach den vorläufigen Einlagerungsbedingungen wird, wie bereits dargestellt, die aus der Nachbetriebsphase abgeleitete Spaltstoffbegrenzung lediglich als maximal zulässiger Gesamtwert aller in einem Kammerquerschnitt zu lagernden Abfallgebinde vorgeschrieben. Im Hinblick auf einen Nachweis der Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase ist dies nicht ausreichend, zumal hierbei vom ungünstigsten Fall der optimalen Moderation ausgegangen werden muß. Unterstellt man weiter im Einzelfall eine Überschreitung der Konzentrationsbeschränkung, so ist es sinnvoll, zusätzlich eine Begrenzung der Spaltstoffmasse im Abfallgebinde auf einen sicheren Wert zu fordern. Deshalb wird eine Massenbegrenzung für das einzelne Abfallgebinde auf 45 % der kleinsten kritischen Masse des jeweiligen Spaltstoffes festgesetzt. Zum Erreichen von Kritikalität in einem Abfallcontainer müßten dann gleichzeitig eine Überschreitung der Massenbegrenzung, optimale Moderation und Konzentration des Spaltstoffes vorliegen. Es ist aber darauf hinzuweisen, daß bei Betrachtung mehrerer dicht gestapelter Abfallcontainer im Falle optimaler Spaltstoffkonzentration und Moderation auch bei Einhaltung der Massenbegrenzung die Kritikalitätssicherheit so nicht nachzuweisen ist. Die Einhaltung der Konzentrationsbegrenzung im Abfallgebinde ist deshalb eine wichtige Bedingung für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit der Betriebsphase.

Die Verhältnisse ändern sich jedoch, wenn man unterstellt, daß die Spaltstoffreste innerhalb eines Containers in Fässern verpackt und die Zwischenräume mit Zement ausgegossen sind. In diesem Fall könnten sowohl höhere Konzentrations- als auch Massenbegrenzungen zugelassen werden. Eine beispielhaft für den Container Typ VI und den Spaltstoff Pu239 durchgeführte Rechnung bestätigt dies (Bild 4). Als Faßinhalt ist hier ein homogenes Gemisch von PuO<sub>2</sub> und Wasser bei einer Spaltstoffdichte von 0,5 g Pu pro Liter und optimaler Moderation angesetzt worden. Diese Anordnung ist für eine beliebig große Anzahl gestapelter Container dieses Typs kritikalitätssicher ( $k_{\infty} \leq 0,25$ ). Setzt man für den Faßinhalt ebenfalls eine Zementmatrix an, so ist eine weitere Reaktivitätsminderung zu erwarten. Genaue Grenzwerte müßten aber durch Rechnungen noch abgesichert werden.



Aus der oben begründeten Massenbegrenzung (45 %) ergibt sich für Pu239 ein Grenzwert von 0,23 kg pro Abfallgebinde, für U235 beträgt der Wert 0,35 kg und für U233 0,26 kg /6/. Diese Werte stellen maximal zulässige Spaltstoffmassen für das einzelne Abfallgebinde dar (Container oder zylindrische Behälter), sofern sich nicht schon aus der Konzentrationsbegrenzung ein niedrigerer Wert ergibt. Die aus der Sicherheitsanalyse der Nachbetriebsphase resultierenden Einschränkungen für den Kammerquerschnitt (s. Abschnitt 2.2 und /3/) bleiben davon unberührt.

Um die für einzelne Radionuklide festgesetzten Massenbegrenzungen im Abfallgebinde bei Vorliegen eines Radionuklidgemisches optimal ausschöpfen zu können, hat die PTB ein Summenkriterium angegeben /7/, das auch für Spaltstoffgemische (U und Pu) Anwendung finden soll:

$$\sum_i \frac{M_i}{M_{i \max}} < 1$$

$M_i$  = Masse des Nuklids  $i$

$M_{i \max}$  = Zulässiger Höchstwert

Durch Berechnung kleinster kritischer Kugelmassen für verschiedene Mischverhältnisse von Pu239O<sub>2</sub> und hochangereichertem UO<sub>2</sub> (Massenanteil 95 % U235) bei optimaler Wassermoderation ist an einem Beispiel überprüft worden, ob dieses Summenkriterium zur Massenbegrenzung bei Spaltstoffgemischen anwendbar ist. Dazu wurden die explizit berechneten kleinsten kritischen Massen (Kurve 1 in Bild 5) mit den aus der Summenformel ermittelten Grenzwerten verglichen. Ausgehend von den Einzelgrenzwerten für Pu239 (0,23 kg) und U235 (0,35 kg) sind Grenzwerte für das jeweilige Mischverhältnis dieser Radionuklide berechnet worden (Kurve 2 in Bild 5).

Wie der Vergleich zeigt, ist es aufgrund des großen Sicherheitsabstandes der Einzelgrenzwerte vertretbar, das Summenkriterium zur Ermittlung der Massenbegrenzung für ein U-Pu-Gemisch anzuwenden.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

In Sicherheitsanalysen für die Betriebs- und Nachbetriebsphase im Endlager KONRAD sind unter verschiedenen Randbedingungen Werte für die Spaltstoffmasse in Abfallgebinden berechnet worden, die unter den getroffenen Annahmen Grenzwerte zur Kritikalitätssicherheit darstellen.

Für die Nachbetriebsphase wird untersucht, bei welcher Spaltstoffmasse nach vollständigem Auslaugen des Abfallgebindeinhaltes durch Salzwasser ein kritisches Spaltstoffsystem denkbar ist. Dafür werden zwei verschiedene Rechenmodelle nach Vorgaben der PTB zugrundegelegt /1/. Im ersten Fall wird für die Gesamtmasse an Spaltstoff aus 100 Abfallfässern in Kugelgeometrie gerechnet, im zweiten Fall wird für eine verfüllte Einlagerungskammer (ca. 23800 Abfallfässer) eine gleichmäßige schichtförmige Verteilung der gelösten Spaltstoffreste angesetzt. Beide Ansätze sind sehr konservativ und stützen sich nicht auf die bei Auslaugvorgängen tatsächlich zu erwartenden Schwermetallkonzentrationen. Für die Betriebsphase wird untersucht, ob bei vorgegebener Spaltstoffkonzentration in den Abfallgebinden durch Stapelung mehrerer Container Kritikalität möglich ist.

Im folgenden sind die auf das einzelne Abfallgebinde (Container) umgerechneten kritischen Spaltstoffmassen und die jeweiligen Randbedingungen tabellarisch zusammengefaßt. Die Ergebnisse sollen dem Antragsteller des Endlagers KONRAD als Richtwerte zur Festsetzung maximal zulässiger Spaltstoffmassen und Konzentrationen in den Abfallgebinden dienen.

Randbedingungen und Rechenannahmen	Spalt- stoff	Anreicherung	kritische Masse pro Faß-Container in kg Schwer- metall
---------------------------------------	-----------------	--------------	---

Nachbetriebsphase,	UO <sub>2</sub>	95 % U235	0,2
Spaltstofflösung aus	UO <sub>2</sub>	5 % U235	26,4
10 Containern mit	PuO <sub>2</sub>	100 % Pu239	0,1
Chloridanteil, Kugel- geometrie, Reflektor	PuO <sub>2</sub>	59 % Pu239	0,5

Nachbetriebsphase,	UO <sub>2</sub>	95 % U235	25,0
Spaltstofflösung mit	PuO <sub>2</sub>	100 % Pu239	12,7
Salzanteil, Schicht- geometrie, Reflektor	PuO <sub>2</sub>	59 % Pu239	33,3

Sichere Masse in  
kg Schwermetall

Betriebsphase, Massen- begrenzung auf 45 % der	UO <sub>2</sub>	100 % U235	0,35
kleinsten krit. Kugel- masse mit Reflektor	UO <sub>2</sub>	5 % U235	17,0
	PuO <sub>2</sub>	100 % Pu239	0,23

Betriebsphase: Generelle Begrenzung der Massenkonzentration 50 g/100 l

UNTERLAGENVERZEICHNIS

- /1/ PTB Schreiben vom 3.6.85 und vom 21.7.86 SE1-Bg/Sp.
- /2/ B. Gmal:  
Systemanalyse KONRAD, Teil 2, Zur Kritikalitätssicherheit im  
Endlager KONRAD, GRS-A-1059, Dezember 1984
- /3/ B. Gmal:  
Systemanalyse KONRAD, Teil 2, Zur Kritikalitätssicherheit im  
Endlager KONRAD bei inhomogener Spaltstoffverteilung,  
GRS-A-1148, Oktober 1985
- /4/ H. Brühl: Migrationsuntersuchungen im Bereich der Schachtanlage  
KONRAD, nebst Probenahme, Institut für Angewandte Geologie der  
FU Berlin, I. Halbjahresbericht 1984
- /5/ J.A. Bucholz, SCALE: A Modular Code-System for Performing  
Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation,  
ORNL/NUREG/CSD-2, 1980
- /6/ W. Heinicke et. al.:  
Handbuch zur Kritikalitätssicherheit Teil II, III  
GRS Garching, Dezember 1985
- /7/ H.P. Berg: Ableitung von Spaltstoffbegrenzungen in Abfallgebinden  
aus den Analysen zur Kritikalitätssicherheit im Endlager KONRAD,  
PTB-SE-IB-6, August 1986

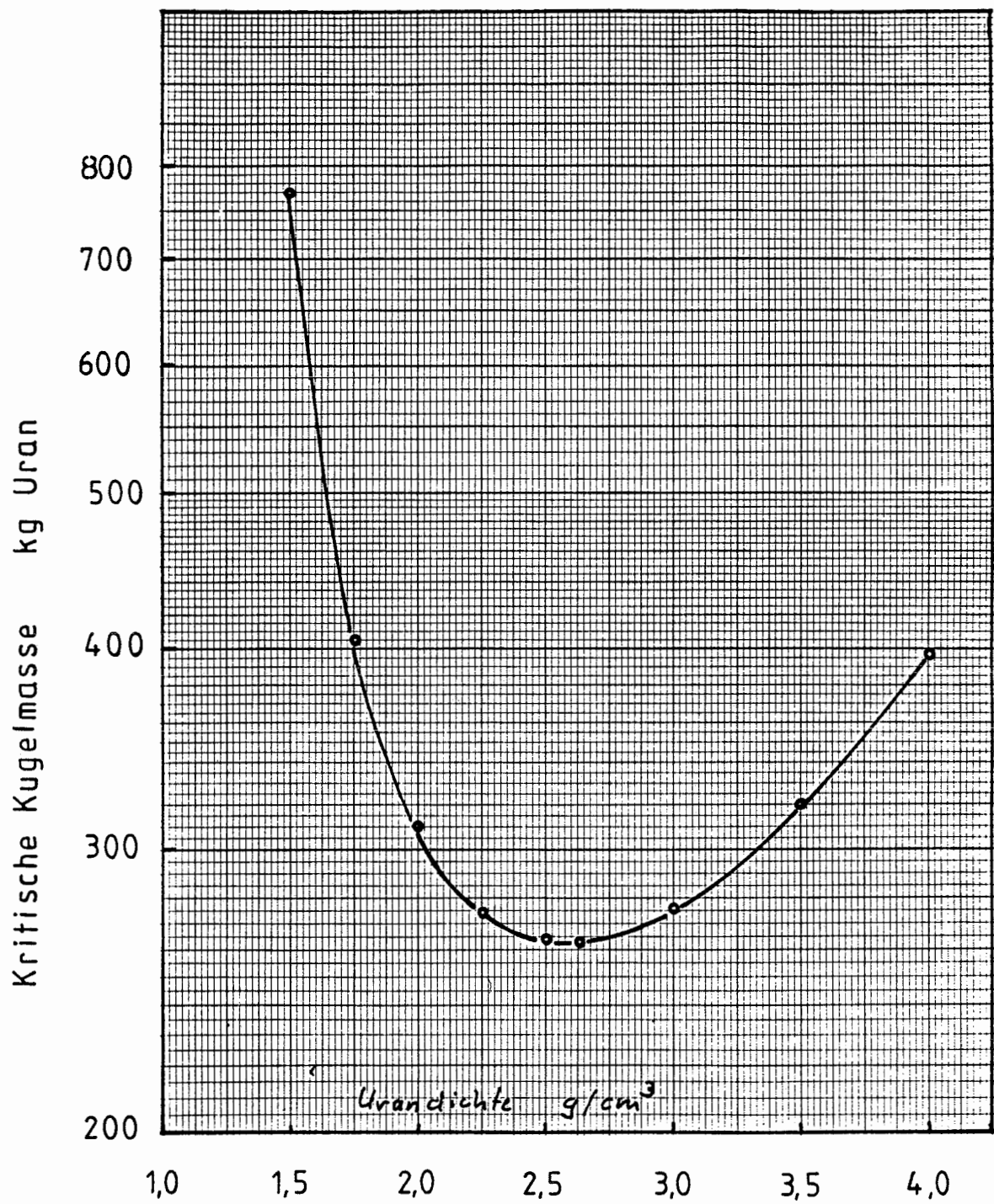


Bild 1:

Kleinste kritische Kugelmassen für ein Gemisch von niedrig angereichertem  $\text{UO}_2$  (Massenanteil 5 %  $\text{U}^{235}$ ) und Wasser.

# KENO KONRAD BETR. CONTAINER TYP III

---

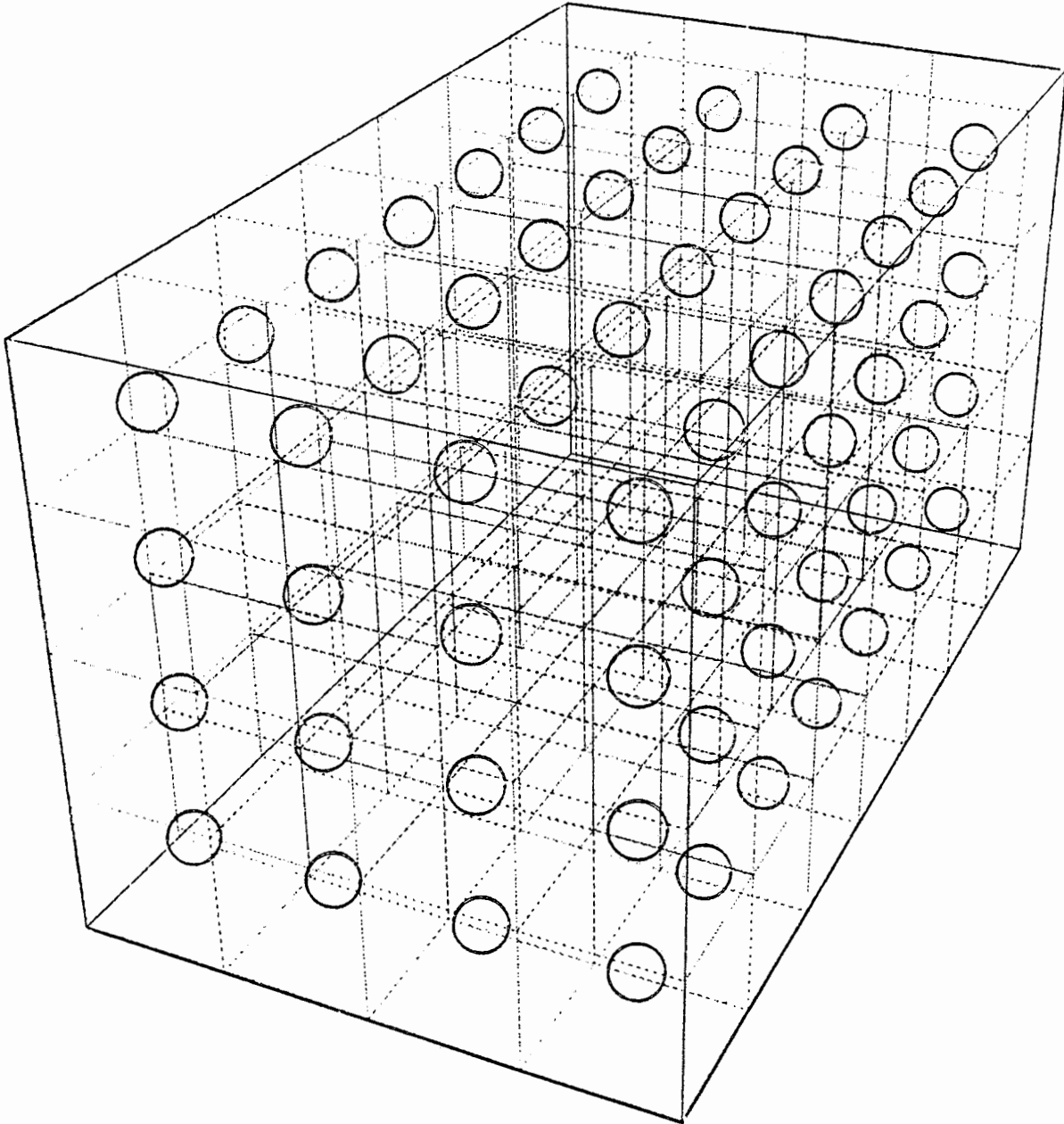


Bild 2:

Rechenmodell einer kugelförmigen Spaltstoffverteilung im Container.

---

KENO KONRAD BETR. CONTAINER TYP III

---

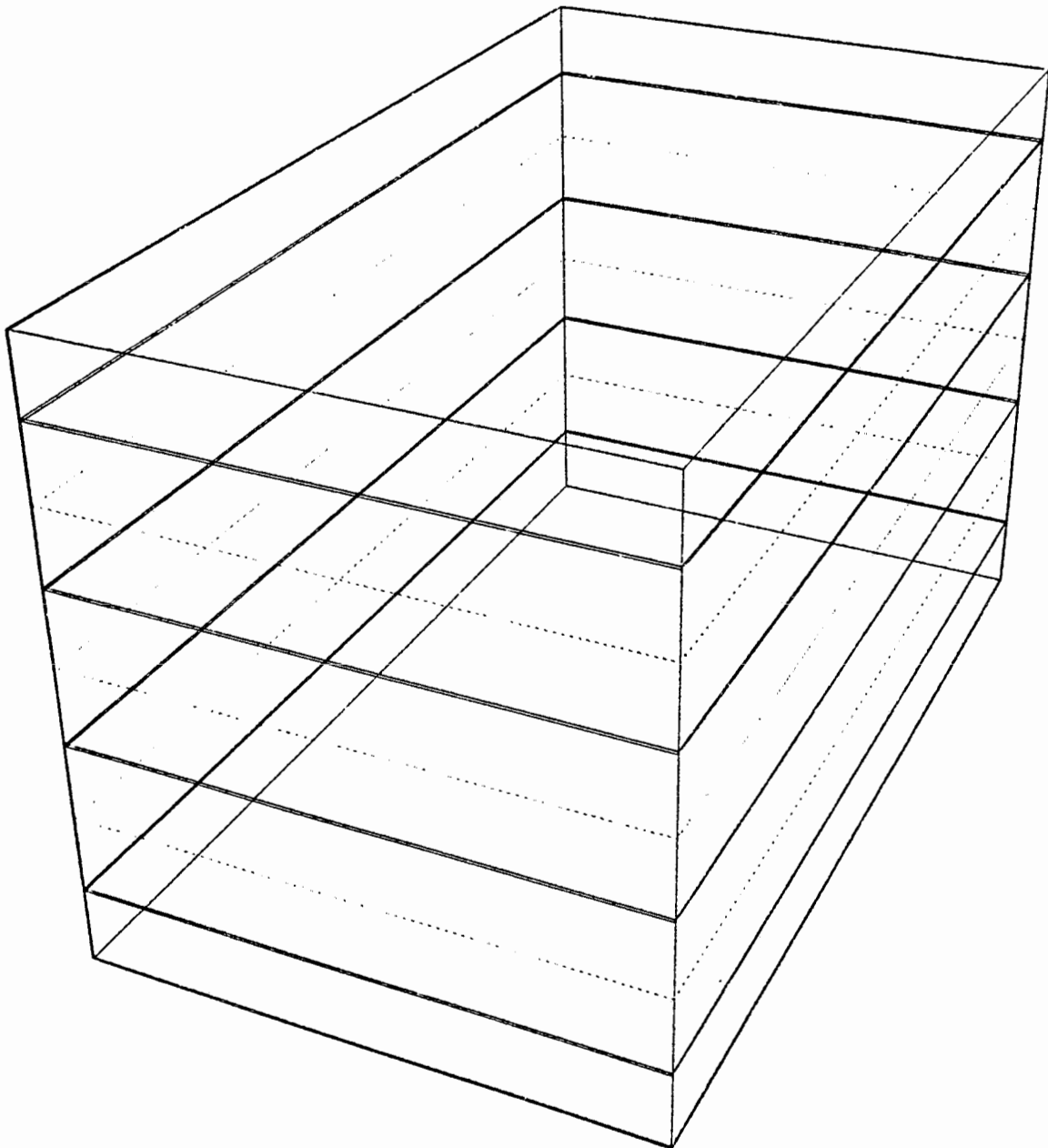


Bild 3:

Rechenmodell einer schichtweisen Spaltstoffverteilung im Container.

# FASS-CONTAINER TYP VI 50 G PU/100 L

---

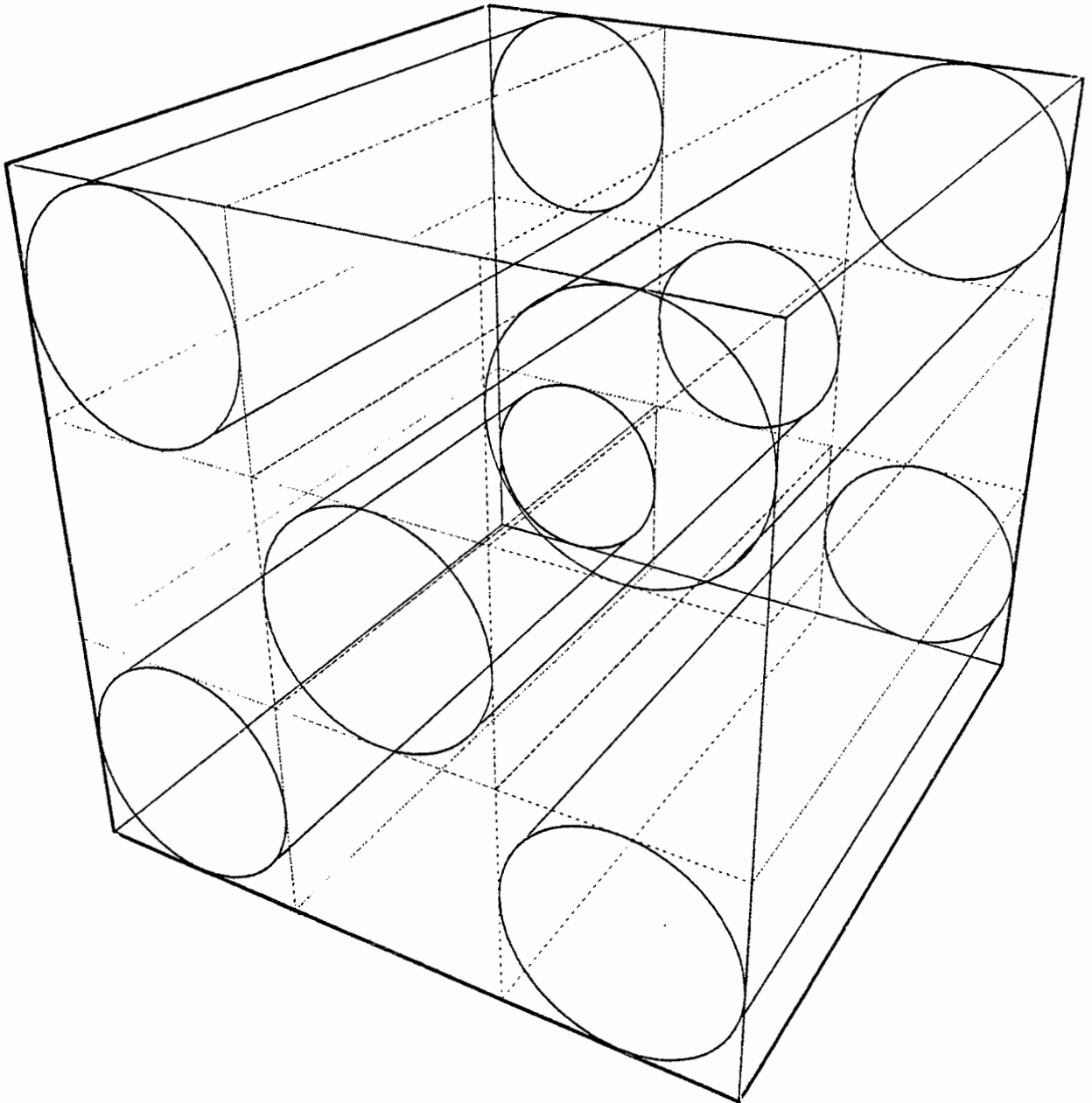


Bild 4:

Rechenmodell für den Container Typ VI mit 10 200 l-Fässern.  
Die Zwischenräume sind mit Zement ausgefüllt.



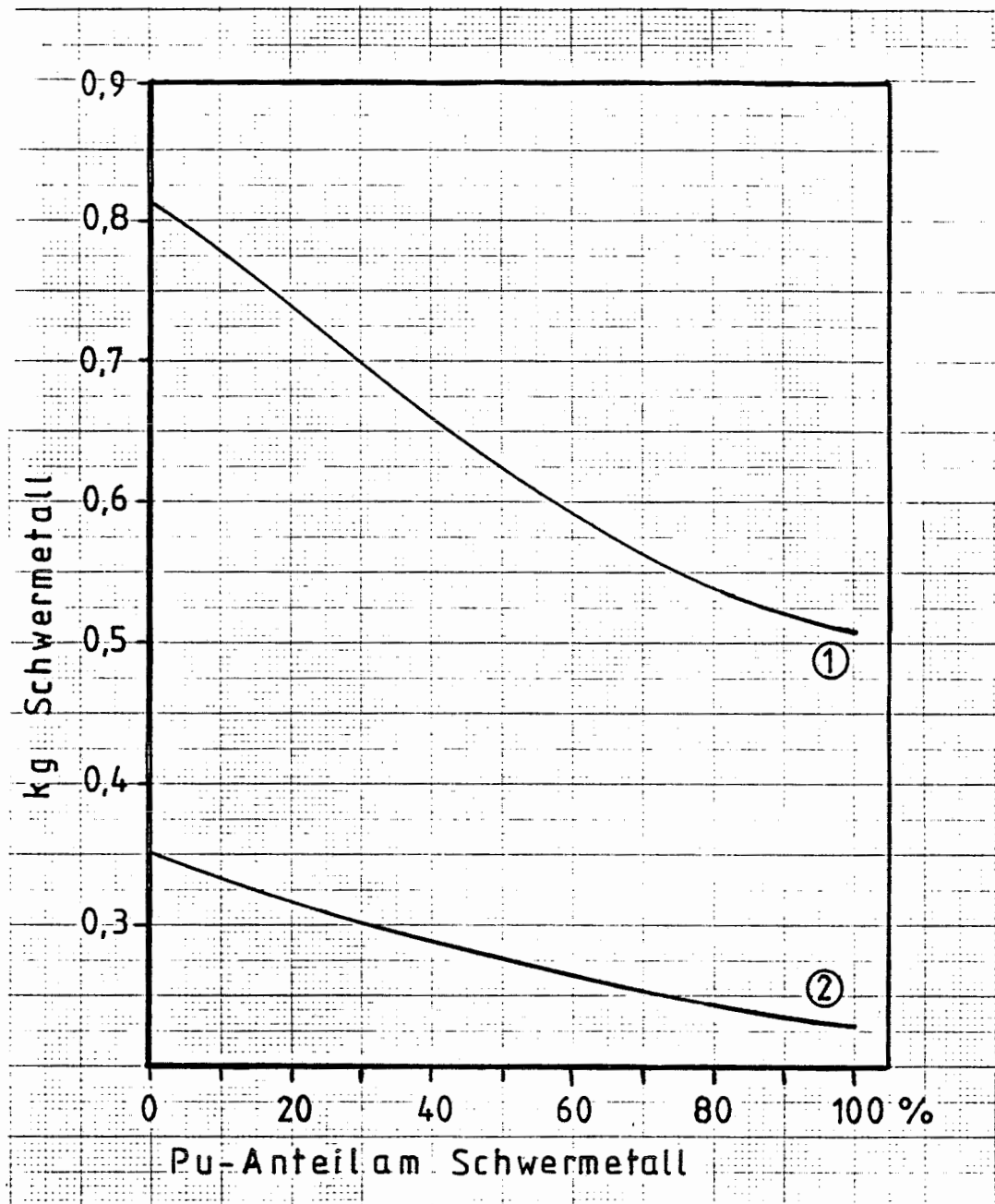


Bild 5:

Überprüfung der Summenformel für ein Spaltstoffgemisch von hochangereichertem  $UO_2$  (95 %  $U^{235}$ ) und  $Pu^{239}O_2$  bei variablem U/Pu-Verhältnis, optimale Moderation und Reflexion durch  $H_2O$ .

- 1) Kleinste kritische Massen, berechnet mit Transportcode XSDRNPM
- 2) Grenzwerte berechnet nach der Summenformel