

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

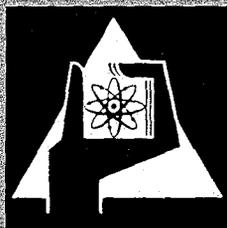
September 1970

KFK 1263

Reaktorbetrieb und Technik

Transport von hochaktiven verglasten Spaltprodukten

W. Bechthold



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

September 1970

KFK 1263

Reaktorbetrieb und Technik

Transport

von hochaktiven verglasten Spaltprodukten

W. Bechthold

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH, KARLSRUHE

Abstrakt

Hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle sind in Glas verfestigte Spaltprodukte aus Wiederaufarbeitungsanlagen, die in Stahlzylinder eingeschmolzen sind.

Die Voraussetzungen für den Transport dieser Zylinder von Karlsruhe zum ehemaligen Salzbergwerk ASSE (Entfernung ca. 500 km) werden untersucht. Dabei werden die IAEA-"Vorschriften für den sicheren Transport von radioaktiven Materialien" zugrundegelegt.

Es werden die benötigten Abschirmdicken des Transportbehälters in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern sowie die zur Ableitung der Spaltprodukt-Nachwärme notwendigen Maßnahmen ermittelt.

Die Sicherheit des Transportbehälters bei Unfällen während des Transports wird insbesondere in Hinblick auf den 9 m-Falltest und das Schadensfeuer untersucht.

Eine abschließende Untersuchung gibt Aufschluß über die voraussichtlichen Transportkosten und ist Grundlage für Betrachtungen zur Optimierung des Transports.

Abstract

High level heat generating wastes are vitrified fission products from reprocessing plants welded into cylindrical steel tubes.

The preconditions for the transportation of these tubes from Karlsruhe to the abandoned ASSE salt mine (distance about 500 km) are investigated. The investigations are based on the IAEA-"Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials".

The necessary shielding of the shipping cask is determined as a function of various parameters and the measures required for removal of the fission product afterheat generated within the glass are calculated.

The safety of the transportation cask in accidents during transport is investigated especially in the light of the 9 m - drop test and the 30 min fire test.

A final optimization consideration of the transportation is based on a calculation of the anticipated costs.

I. Einleitung

Die in Wiederaufarbeitungsanlagen anfallenden stark radioaktiven und wärmeentwickelnden Spaltprodukte müssen so gelagert werden, daß sie für immer von der Biosphäre isoliert sind. Neben verschiedenen anderen Möglichkeiten bietet sich die Einlagerung in tiefen geologischen Schichten an. Hierfür sind in Deutschland am besten Salzformationen geeignet, die in Norddeutschland reichlich vorhanden sind. Salzstöcke haben keine Verbindung zum Grundwasser und liegen im Allgemeinen in Gegenden mit geringer Erdbebentätigkeit. Die relativ gute Wärmeleitfähigkeit von Salz ermöglicht die Abfuhr und gleichmäßige Verteilung der Nachwärme der Spaltprodukte in den Salzstock.

Die Voraussetzungen für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der BRD werden im ehemaligen Salzbergwerk ASSE in Remlingen bei Wolfenbüttel geschaffen.

Die erste Anlage zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen (WAK) in der BRD wurde in Karlsruhe errichtet. Bei einem Jahresdurchsatz von ca. 40 t Uranoxid (entsprechend einer elektrischen Leistung von ungefähr 1 GW) steht hier noch die Gewinnung von Betriebserfahrungen mit einer Anlage im technischen Maßstab im Vordergrund.

Die WAK arbeitet nach dem Lösungsmittlextraktionsverfahren. Die in einer Lösung anfallenden Spaltprodukte werden vor der Endlagerung nach einer Abklingzeit von mehreren Jahren in Borsilicat-Gläsern homogen verteilt eingeschmolzen. Hierfür wird zunächst eine Pilot-Anlage zur Verfestigung radioaktiver Abfälle (VERA) mit einem Ausstoß von 30 bis 50 Glaszylindern pro Jahr gebaut. Die Glaszylinder werden etwa 20 l Inhalt haben und ungefähr 9 kg Spaltprodukte enthalten.

Im vorliegenden Bericht werden die Voraussetzungen für die sichere Beförderung dieser Glaszylinder von Karlsruhe zum Bergwerk ASSE untersucht. Als Grundlage hierfür dienen einerseits die von der WAK und der VERA gelieferten bzw. zu erwartenden Werte und andererseits die Sicherheitsvorschriften für den Transport radioaktiver Materialien.

Ziel der Berechnungen war, einen Überblick über die zu erwartenden Behälter-Daten zu gewinnen, nicht jedoch eine detaillierte Konstruktion zu liefern.

Teil 1: Aktivitäten und Strahlenschutzrechnung

1.1 Einführung

Das Gewicht des Transportbehälters und damit die Kosten für den Transport der Spaltprodukte werden bestimmt durch die Wandstärken, die zur Abschirmung der von den Spaltprodukten ausgesendeten γ -Strahlung benötigt werden.

Die zulässige Konzentration der Spaltprodukte im Glas sowie die Größe der Glaszylinder können von verschiedenen Faktoren (Herstellung, Transport, Endlagerung) beeinflusst werden. Um der Berechnung eine möglichst breite Basis zu geben, wurden die Abklingzeit der Spaltprodukte, die Konzentration der Spaltprodukte im Glas sowie die Abmessungen der Glaszylinder variiert.

Es wurden Anteile von 460 bzw. 690 g Spaltprodukten je Liter Glas zugrundegelegt. Durchmesser und Länge der Glaszylinder wurden wie folgt variiert:

$$l = 60 \text{ cm}$$

$$l = 100 \text{ cm}$$

$$l \rightarrow \infty$$

$$d = 20 \text{ cm}$$

$$d = 25 \text{ cm}$$

$$d = 30 \text{ cm}$$

Die Rechnung wurde für die drei in der BRD wichtigsten Reaktortypen getrennt durchgeführt:

- Natrium-Brut-Reaktor (NaBr)
(Bestrahlungsdauer 2 Jahre)
- Leichtwasser-Reaktor (LWR)
(Bestrahlungsdauer 4 Jahre)
- Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR)
(Bestrahlungsdauer 6 Jahre)

Bei allen Reaktortypen wurde ein Lastfaktor von 0,7 zugrundegelegt.

Die Berechnungen wurden für einen Stahlbehälter durchgeführt, da bei Verwendung von Verbundbehältern (Bleibehälter mit innerer und äußerer Stahlstützschale) zwar geringere Wandstärken nötig wären, jedoch - wie in Teil 3 gezeigt wird - bei den zu erwartenden Temperaturbeanspruchungen ein zumindest lokales Aufschmelzen des Bleis nicht mit Sicherheit auszuschließen ist und die damit verbundene etwa 3,5%ige Volumenvergrößerung zu nur schwer kontrollierbaren Druckbeanspruchungen der Stahlstützschalen führen würde.

1.2 Berechnung der Dosisleistung außerhalb des Behälters

1.2.1 Strahlenabschirmung

Nach (1), S. 360, wird die Dosisleistung DL außerhalb einer abgeschirmten zylinderförmigen Strahlenquelle berechnet:

$$DL = \frac{S_v B U}{8 (a + z)} d^2 \int e^{-(\mu_x + \mu_s z) \cos \theta} \frac{1}{\cos \theta} d\theta \left(\frac{\text{rem}}{\text{h}} \right)$$

Dabei sind:

- S_v ($\gamma/\text{cm}^3\text{s}$) = Quellstärke der Volumenquelle
- B = Dosis-Aufbaufaktor
 $B = A_1 e^{-\alpha_1 \mu x} + A_2 e^{-\alpha_2 \mu x}$ ((1), S. 8)
 $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ werden aus (1), S. 417 entnommen.
- μ ($1/\text{cm}$) = Absorptionskoeffizient des Abschirmmaterials
((1), S. 447)
- μ_s ($1/\text{cm}$) = Absorptionskoeffizient des Quellmaterials
(Er wird mit Kenntnis der elementaren Zusammensetzung des Glas-Spaltprodukt-Gemisches für die einzelnen γ -Energien berechnet)
- x (cm) = Abschirmdicke
- U ($\frac{\text{rem cm}^2\text{s}}{\gamma \text{ h}}$) = Umrechnungsfaktor von Photonenfluß in Dosisleistung ((1), S. 19)
- θ (1) = Gegenwinkel am Berechnungspunkt zur halben Länge l der Ersatz-Linienquelle $\theta = \arctan \frac{1}{2(a+z)}$
- a (cm) = Entfernung des Berechnungspunktes von der Oberfläche der Zylinderquelle.
Bei der Festlegung von a werden die Forderungen des DIN-Norm-Entwurfes 54115 aus dem Jahre 1969 zugrundegelegt (2):
"Bei geschlossenen Lagungen in Eisenbahn- und Straßenfahrzeugen darf die Äquivalentdosisleistung die folgenden Werte nicht überschreiten:

1. $200 \frac{\text{mrem}}{h}$ an einer leicht zugänglichen Außenseite des Wagens;
2. $10 \frac{\text{mrem}}{h}$ in 2 m Abstand von irgendeiner Außenseite des Wagens."

Mit der Annahme, die Fahrzeugbreite sei 2 m, beinhaltet die erste Bedingung $a = 1$ m, die zweite $a = 3$ m. Die zweite Bedingung erfordert in diesem Fall die größeren Abschirmdicken. Daher wurde die Berechnung auf diesen Fall beschränkt.

z (cm) = Selbstabsorptionsdicke der Zylinderquelle, d.h. Abstand der Ersatz-Linienquelle von der Zylinderoberfläche.

Sie wird mit Kenntnis des Selbstabsorptionskoeffizienten des Quellmaterials und der Geometrie aus (1), S. 361, entnommen.

Von den o.a. Größen ist nur S_v abhängig von Art und Menge der Spaltprodukte. Die übrigen Größen sind Funktionen der γ -Energie sowie der geometrischen Verhältnisse. Es ist daher zweckmäßig, die Quellstärken der Spaltprodukte aus den drei Reaktortypen gesondert zu berechnen und danach mit dem Produkt

$$\frac{B U}{8 (a+z)} d^2 \int e^{-(\mu_x + \mu_s z)} \frac{1}{\cos \theta} d\theta$$

zu multiplizieren.

1.2.2 Quellstärke

Die Aktivität eines Spaltproduktes nach der Entnahme aus dem Reaktor wird berechnet aus:

$$\lambda S = N_R \cdot y (1 - e^{-\lambda t_R}) e^{-\lambda t_K}$$

Dabei sind:

λ (1/s)	= Zerfallskonstante des Spaltproduktes
S (∕)	= Anzahl der Spaltproduktatome
N_R ($\frac{\text{Spaltungen}}{s}$)	= Leistung des Brennstoffs im Reaktor
y ($\frac{\text{Atome}}{\text{Spaltung}}$)	= Spaltausbeute der jeweiligen Isobare
t_R (s)	= Bestrahlungsdauer im Reaktor
t_K (s)	= Kühlzeit

Daraus folgt die spezifische Quellstärke:

$$S_v = \frac{4 \cdot \lambda \cdot S}{\pi \cdot d^2 \cdot l}$$

1.2.2.1 Leistung des Brennstoffs im Reaktor

Für die infrage kommenden Brennstoffe gilt:

$$1 \text{ Spaltung} \triangleq 200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Ws}$$

Daraus folgt:

$$1 \text{ MW} = 3,1 \cdot 10^{16} \frac{\text{Spaltungen}}{s}$$

$$1 \text{ MWd} = 27 \cdot 10^{20} \text{ Spaltungen}$$

$$\text{Spaltstoffverbrauch} = \frac{\text{Atomgew.d.Brennstoffs}}{\text{Loschmidt-Zahl}} \cdot \text{Anzahl der Spaltungen}$$

Zur Erzeugung der thermischen Energie 1 MW_a werden somit ca. 384 g Spaltstoff benötigt. Bei dem Anlagenwirkungsgrad $\eta = 0,38$ entstehen je MW_{el} a 1 kg Spaltprodukte.

Die nuklear erzeugte Energie (MW_{th} a), bei der die in einem Glaszylinder gebundenen Spaltprodukte gebildet werden, ist in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 1.2.-1

Spaltprodukte Liter Glas	460 g			690 g			
	d (cm)	20	25	30	20	25	30
60		23	35	51	34	53	76
100		38	59	85	56	88	127

1.2.2.2 Die für die Strahlenschutzrechnung wichtigen Spaltprodukte

Bei der Ermittlung der Aktivität der Spaltprodukte können

- wegen der Häufigkeitsverteilung der anfallenden Spaltprodukte solche mit Massenzahlen $A \leq 80$ und $A > 160$ vernachlässigt werden,
- alle Spaltprodukte mit Halbwertzeiten $T_{1/2} < 40$ d außer acht gelassen werden, da die Kühlzeit mindestens 1 Jahr betragen wird,
- Spaltprodukte vernachlässigt werden, bei denen die γ -Energien kleiner als 0,6 MeV sind, da kleinere γ -Energien bei den hier benötigten Abschirmdicken nur noch sehr geringe Dosisleistungen außerhalb der Abschirmung erzeugen.

In den folgenden Tabellen sind die für die Berechnung der Dosisleistung wichtigen Spaltprodukte sowie deren Aktivitäten enthalten.

Zur Vereinfachung der Rechnung wurde eine Aufteilung in vier Energiebereiche (2,3 MeV; 1,5 MeV; 1,2 MeV; 0,8 MeV) vorgenommen.

(Tab. 1.2.-2 und 1.2.-3)

Tabelle 1.2 - 2

Die für die Strahlenschutzrechnung wichtigsten Spaltprodukte

Nuklid	T _{1/2}	γ-Energie ¹⁾ (MeV) (Anteil (%))	thermische Spaltung		schnelle Spaltung ⁴⁾ Pu-239 y(%)	Energiegruppen- Zuordnung 2,3 1,5 1,2 0,8
			U-235 ²⁾ y(%)	U-235 ³⁾ y(%)		
Y ⁹¹	59 d	1,21 (0,3)	6,5	5,9	2,77	x
Zr ⁹⁵	65 d	0,76 (43)	6,1	6,3	5,27	x
		0,726 (55)				x
Ru ¹⁰⁶	1,0 a	2,41 (0,25) ²⁾	0,24	0,38	6,35	x
		1,55 (0,5)				x
		1,045 (2)				x
		0,87 (1)				x
		0,624 (12)				x
Sb ¹²⁵	2,7 a	0,67	0,16	0,023	0,26	x
		0,65 (38)				x
		0,63				x
		0,6				x
Cs ¹³⁷ Ba ¹³⁷	30 a	0,66 (85)	6,3	5,9	5,8	x
Ce ¹⁴⁴ Pr ¹⁴⁴	284 d	2,18 (1)	4,5	6,1	3,7	x
		1,48 (2)				x
		0,69 (1,6)				x

1) nach (3), S. 21 ff

2) nach (4), S. 14

3) nach (5), S. 950 ff

4) nach (6), S. 18

Tabelle 1.2 - 3

Quellestärke S_v $\left(\frac{10^9 \gamma}{\text{cm}^3 \text{s}}\right)$ in Abhängigkeit von der Kühlzeit

460 g Spaltprodukte je Liter Glas

Nuklid ^{t_K}	NaBr			PWR			THTR		
	1a	2a	4a	1a	2a	4a	1a	2a	4a
	Gruppe: 0,8 MeV								
Zr ⁹⁵	27,8	0,58	<10 ⁻²	16,5	0,35	<10 ⁻²	10,6	0,22	<10 ⁻²
Ru ¹⁰⁶	82,1	41	10,2	3,1	1,5	0,38	1,35	0,68	0,17
Sb ¹²⁵	8,1	6,3	3,8	0,58	0,45	0,27	3,3	2,5	1,51
Cs ¹³⁷	57,4	56,1	53,5	57,1	55,8	53,3	59,5	58,2	55,5
Ce ¹⁴⁴	5,4	2,2	0,36	5,2	2,1	0,35	2,6	1,1	0,18
Σ	181	106,2	67,9	82,5	60,2	54,3	77,4	62,7	57,4
	Gruppe: 1,2 MeV								
Y ⁹¹	0,031	<10 ⁻²	<10 ⁻³	0,03	<10 ⁻³	<10 ⁻⁴	0,02	<10 ⁻³	<10 ⁻⁴
Ru ¹⁰⁶	12,6	6,31	1,58	0,47	0,24	0,06	0,21	0,10	0,03
Σ	12,63	6,31	1,58	0,50	0,24	0,06	0,23	0,10	0,03
	Gruppe: 1,5 MeV								
Ru ¹⁰⁶	3,16	1,58	0,39	0,12	0,06	0,01	0,05	0,03	0,01
Ce ¹⁴⁴	6,68	2,76	0,46	6,44	2,66	0,44	3,24	1,33	0,22
Σ	9,84	4,34	0,85	6,56	2,72	0,45	3,29	1,36	0,23
	Gruppe: 2,3 MeV								
Ru ¹⁰⁶	1,58	0,79	0,20	0,06	0,03	0,01	0,03	0,01	<10 ⁻²
Ce ¹⁴⁴	3,34	1,38	0,23	3,22	1,33	0,22	1,62	0,67	0,11
Σ	4,92	2,17	0,43	3,28	1,36	0,23	1,65	0,68	0,11

1.2.3 Ergebnisse

Das Restprodukt $\frac{B \cdot U}{8(a+z)} d^2 \int e^{-(\mu x + \mu_s z)} \frac{1}{\cos \theta} d\theta$

wird wie unter 1.2.1 angegeben für die einzelnen γ -Energien und die verschiedenen Behälter- und Glaszylinderabmessungen gebildet. Seine Werte werden mit den zugehörigen Werten der Quellstärke multipliziert.

In Tabelle 1.2.-4 bis 6 ist die Dosisleistung ($\frac{\text{mrem}}{\text{h}}$) zur Verdeutlichung des wachsenden Einflusses der hochenergetischen γ -Energien bei wachsenden Abschirmdicken und der unterschiedlichen Abklinggeschwindigkeiten der einzelnen Energiegruppen für jeweils eine Konzentration und eine Glaszylindergröße angegeben.

Es ist zu erkennen, daß bei gleicher Kühlzeit bei einer Vergrößerung der Abschirmdicke um z.B. 5 cm die Dosisleistung der Gruppe 0,8 MeV um etwa den Faktor 10 sinkt, die der Gruppe 2,3 MeV jedoch nur um den Faktor 4.

Tabelle 1.2. - 4

Tabelle 1.2. - 4

Dosisleistung DL ($\frac{\text{mrem}}{\text{h}}$) in Abhängigkeit von der Kühlzeit

NaBr - Spaltprodukte

460 g Spaltprodukte je Liter Glas

l = 60 cm

d = 20 cm

Energie-
Gruppe
(MeV)

	1 a	2 a	4 a	
0,8	12,49	7,31	4,69	
1,2	14,52	7,26	1,82	x = 30 cm
1,5	50,18	22,13	4,34	
2,3	216,48	95,48	18,70	
Σ	293,67	132,18	29,55	
0,8	1,34	0,78	0,50	
1,2	2,40	1,20	0,30	x = 35 cm
1,5	9,84	4,34	0,85	
2,3	54,12	23,87	4,68	
Σ	67,70	30,19	6,33	
0,8	0,12	0,07	0,05	
1,2	0,36	0,18	0,05	x = 40 cm
1,5	1,87	0,82	0,16	
2,3	13,78	6,08	1,19	
Σ	16,13	7,15	1,45	
0,8	0,01	0,01	0,00	
1,2	0,05	0,03	0,01	x = 45 cm
1,5	0,34	0,15	0,03	
2,3	3,89	1,71	0,34	
Σ	4,29	1,90	0,39	

Tabelle 1.2. - 5

Dosisleistung DL ($\frac{\text{mrem}}{\text{h}}$) in Abhängigkeit von der Kühlzeit

LWR - Spaltprodukte

460 g Spaltprodukte je Liter Glas

l = 60 cm

d = 20 cm

Energie- Gruppe (MeV)	1 a	2 a	4 a	
0,8	5,69	4,16	3,75	
1,2	0,58	0,27	0,07	x = 30 cm
1,5	33,46	13,87	2,32	
2,3	144,32	59,84	9,99	
Σ	184,05	78,14	16,13	
0,8	0,61	0,45	0,40	
1,2	0,10	0,04	0,01	x = 35 cm
1,5	6,56	2,72	0,46	
2,3	36,08	14,96	2,50	
Σ	43,35	18,17	3,37	
0,8	0,05	0,04	0,04	
1,2	0,01	0,01	0,00	x = 40 cm
1,5	1,25	0,52	0,09	
2,3	9,18	3,81	0,64	
Σ	10,49	4,38	0,77	
0,8	0,00	0,00	0,00	
1,2	0,00	0,00	0,00	x = 45 cm
1,5	0,23	0,10	0,02	
2,3	2,59	1,07	0,18	
Σ	2,82	1,17	0,20	

Tabelle 1.2. - 6

Dosisleistung DL ($\frac{\text{mrem}}{\text{h}}$) in Abhängigkeit von der Kühlzeit

THTR - Spaltprodukte

460 g Spaltprodukte je Liter Glas

l = 60 cm

d = 20 cm

Energie- Gruppe (MeV)	1 a	2 a	4 a	
0,8	5,33	4,33	3,96	
1,2	0,27	0,12	0,03	x = 30 cm
1,5	16,78	6,94	1,17	
2,3	72,60	29,92	5,02	
Σ	94,98	41,31	10,18	
0,8	0,57	0,46	0,42	
1,2	0,04	0,02	0,01	
1,5	3,29	1,36	0,40	x = 35 cm
2,3	18,15	7,48	1,25	
Σ	22,05	9,32	2,08	
0,8	0,05	0,04	0,04	
1,2	0,01	0,00	0,00	
1,5	0,63	0,26	0,04	x = 40 cm
2,3	4,62	1,90	0,32	
Σ	5,31	2,20	0,40	
0,8	0,01	0,00	0,00	
1,2	0,00	0,00	0,00	
1,5	0,12	0,05	0,01	x = 45 cm
2,3	1,30	0,54	0,09	
Σ	1,43	0,59	0,10	

1.3 Die erforderlichen Behälterwandstärken

In Abb. 1.3 - 1 bis 6 sind für die unter 1.2.1 angegebene zulässige Dosisleistung die erforderlichen Abschirmdicken in Abhängigkeit von der Kühlzeit angegeben. Eine Abbildung enthält dabei für eine Glaszylinderlänge und einen Konzentrationsgrad die Werte für die drei Reaktortypen NaBr, LWR und THTR und die drei Glaszylinder-Durchmesser 20 cm, 25 cm und 30 cm.

Es zeigt sich erwartungsgemäß, daß für Spaltprodukte von Reaktoren mit großen Bestrahlungsdauern (THTR) bei gleicher Spaltproduktmenge die geringeren Abschirmdicken benötigt werden, weil hier der Anteil an Spaltprodukten mit kurzen Halbwertzeiten verhältnismäßig gering ist.

Es ist zu erkennen, daß nach einer Kühlzeit von beispielsweise zwei Jahren bei Verwendung von Zylindern mit der Länge 60 cm und dem Durchmesser 20 cm bei einem Anteil von 460 g Spaltprodukten je Liter Glas folgende Abschirmdicken benötigt werden:

bei Spaltprodukten eines

NaBr: 39 cm

LWR: 37 cm

THTR: 35 cm

Beim Vergleich der einzelnen Diagramme miteinander fällt auf, daß die Abschirmdicken proportional sind der Menge der je Transportbehälter enthaltenen Spaltprodukte und weitgehend unabhängig von der Konzentration und der Größe der Glaszylinder:

So muß z.B. bei 690 g Spaltprodukten je Liter Glas die Abschirmdicke um etwa 1,5 cm vergrößert werden; bei einer Vergrößerung des Durchmessers auf 25 cm oder bei einer Vergrößerung der Länge auf 100 cm steigen die erforderlichen Abschirmdicken um jeweils etwa 1,6 cm.

Eine Verlängerung der Kühlzeit um zwei Jahre ermöglicht die Verringerung der Abschirmdicke um 4,5 cm bis 6 cm.

Literaturangaben zu Teil 1

- (1) Rockwell, Th., Reactor Shielding Design Manual, McMillan and Co.Ltd., 1956
- (2) DNA, DIN 54 115, Blatt 3 (Entwurf), Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin und Köln, 1969
- (3) Jaeger, R.G., Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. I, Springer-Verlag, 1968
- (4) Glueckauf, Atomic Energy Waste, New York, London, 1961
- (5) Riezler Walcher, Kerntechnik, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1958
- (6) Burris, L., Dillon, J.G., Estimation of Fission Product Spectra in Discharged Fuel from Fast Reactors, ANL-Report 5742

Teil 2: Nachwärme und Wärmeübergang

2.1 Einführung

Die Nachwärme der Spaltprodukte muß durch ein geeignetes Kühlsystem an die Umgebung abgeführt werden. Im Inneren des Transportbehälters wird die Wärme überwiegend durch Strahlung und Wärmeleitung transportiert. Von der Außenwand wird sie durch Konvektion und Strahlung abgegeben. Von Art und Menge und damit von der entwickelten Wärme der Spaltprodukte wird es abhängen, ob eine Zwangsbelüftung des Transportbehälters notwendig ist oder ob die Wärme durch Naturkonvektion abgeführt werden kann.

Als Randbedingung für den Wärmeübergang wurden folgende Temperaturen zugrundegelegt:

Temperatur an der Behälter-Außenwand:	80°C	
Umgebungstemperatur:	38°C	(1)
Maximal zulässige Temperatur im Glaszylinder:	800°C	

Nach (2) C-2.4.3. ist für 12 Stunden je Tag mit folgender Sonneneinstrahlung zu rechnen:

Für ebene Oberflächen

bei waagerechter Lage:	800 cal/cm ²
bei nicht waagerechter Lage:	200 cal/cm ²

für gekrümmte Oberflächen 400 cal/cm²

Diese zusätzliche Wärmezufuhr kann im Sinne einer konservativen Abschätzung vernachlässigt werden, wenn einige Vereinfachungen eingeführt werden:

Es wird angenommen, daß die Wärme auf der Länge der Glaszylinder über die Mantelflächen abgeführt wird.

Der Anteil der Wärmeabfuhr von der Oberfläche infolge Strahlung wird vernachlässigt.

Eine überschlägige Berechnung zeigt, daß die bei diesen Vereinfachungen außer Acht gelassene Wärmemenge etwas größer ist als die Sonneneinstrahlung. Die Rechnung liegt damit auf der sicheren Seite.

2.2 Wärmeezeugung der Spaltprodukte

Die von den Spaltprodukten in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer und der Kühlzeit erzeugte Wärmemenge wird berechnet:

$$Q(t_K, t_R) = K \left[t_K^{-x} - (t_K + t_R)^{-x} \right] \quad (3)$$

Es sind:

$$Q \left(\frac{W}{\text{cm}^3} \right) = \text{Nachwärme der Spaltprodukte pro Volumeneinheit Glaszylinder}$$

$$K \left(\frac{W}{\text{cm}^3} \right) = 6,45 \cdot 10^3 \frac{W}{\text{MW}_{\text{th}}} \cdot P$$

$$P \left(\frac{\text{MW}_{\text{th}}}{\text{cm}^3} \right) = \text{thermische Leistung im Reaktor, bei der die je Volumeneinheit Glaszylinder enthaltenen Spaltprodukte erzeugt wurden}$$

$$t_K \text{ (d)} = \text{Kühlzeit}$$

$$t_R \text{ (d)} = \text{Bestrahlungsdauer}$$

$$x = 0,33$$

Die Nachwärmeezeugung der Spaltprodukte ist in Abb. 2.3.-1 sowie 2.4.-1 in Abhängigkeit von der Kühlzeit aufgetragen.

Erwartungsgemäß ist die Wärmeezeugung der NaBr-Spaltprodukte am größten, die der THTR-Spaltprodukte am geringsten.

2.3 Wärmeabfuhr von der Behälteroberfläche

2.3.1 Freie Konvektion an glatter Oberfläche

Die von einer Oberfläche abgegebene Wärmemenge wird berechnet nach

$$Q = \alpha F \Delta t$$

Die Wärmeübergangszahl α ist abhängig von der Nußelt-Zahl Nu, der Wärmeleitzahl des umgebenden Mediums λ und dem Durchmesser des Zylinders:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{D_a}$$

Für laminare Umströmung eines waagerechten Zylinders ist

$$Nu = 0,40 \sqrt[4]{Gr \cdot Pr}$$

Für turbulente Umströmung kann man setzen:

$$Nu = 0,129 \sqrt[3]{Pr \cdot Gr} \quad (4)$$

Pr wird (4), Db 4 entnommen.

$$Gr = \frac{D_a^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2}$$

D_a (m) = = Außendurchmesser des Transportbehälters

$\beta \left(\frac{1}{\text{grd}} \right)$ = = Wärmeausdehnungszahl der Kühlluft

Δt (grd) = = Temperaturdifferenz zwischen Behälterwand und Umgebung

$\nu \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$ = = kinematische Zähigkeit der Luft

Turbulente Umströmung liegt vor, wenn $Pr \cdot Gr > (10^8 \div 10^9)$.
Das ist in der vorliegenden Berechnung der Fall.

Damit kann die Wärmeübergangszahl α_0 des glatten Zylinders berechnet werden.

Es zeigt sich, daß von einer glatten Oberfläche bei freier Konvektion die von den Spaltprodukten entwickelte Nachwärme nur abgeführt werden kann, wenn die Kühlzeit länger als vier Jahre ist.

2.3.2 Freie Konvektion an berippter Oberfläche

Bei der Berechnung der Wärmeabfuhr von der berippten Oberfläche wird nach (4), Mb verfahren.

In der Gleichung

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t$$

ist dann α die "scheinbare" Wärmeübergangszahl der berippten Fläche und F die gesamte äußere Oberfläche:

$$\alpha = \alpha_R \left(1 - (1 - \eta) \frac{F_R}{F} \right)$$

$$F = F_R + F_G$$

F_R = Rippenoberfläche

F_G = freie Oberfläche des Grundmaterials zwischen den Rippen

α_R = mittlere Wärmeübergangszahl der berippten Fläche

η = Rippenwirkungsgrad

Für die Berechnung der abführbaren Wärmemenge der berippten Oberfläche mit der Flächenvergrößerung $\frac{F}{F_0}$ wird $\frac{F}{F_0}$ vorgegeben. Damit folgt aus (4) Mb 3 $\frac{\alpha_R}{\alpha_0}$ und mit α_0 wird α_R berechnet.

Die geometrische Form der Rippen wird noch nicht festgelegt. Es wird gesetzt:

$$\left(1 - \left(1 - \frac{F_R}{F}\right)\right) = 0,9$$

Damit wird

$$\alpha = \alpha_R \cdot 0,9$$

2.3.3 Wärmeübergang bei Zwangskonvektion

Beim Transport von Spaltprodukten mit geringen Kühlzeiten ist die von einer berippten Oberfläche bei Naturkonvektion abführbare Wärmemenge noch zu gering. Daher ist gegebenenfalls eine Zwangsbelüftung der Oberfläche vorzusehen.

Hierfür ist die Nußelt-Zahl

$$Nu = 1,11 \cdot C \cdot Re^m Pr^{0,31} \left(0,785 \frac{T_w}{T_0}\right)^{m/4} \quad (4), G c 1$$

$$Re = \frac{w \cdot D_a}{\nu}$$

$w \left(\frac{m}{s}\right)$ = Kühlluftgeschwindigkeit

$T_w (^{\circ}K)$ = mittlere Oberflächentemperatur des Zylinders

$T_0 (^{\circ}K)$ = Temperatur der Kühlluft

Die Konstanten C und m werden (4), G c 1 entnommen.

Es wird zunächst die Wärmeübergangszahl des glatten Zylinders in Abhängigkeit von der Kühlluftgeschwindigkeit berechnet, danach die Wärmeübergangszahlen der berippten Oberfläche.

2.3.4 Ergebnisse

Die von der Oberfläche abführbare Wärmemenge kann Abb. 2.3.-1 entnommen werden.

So ist beispielsweise für den Transport von Spaltprodukten eines Leichtwasserreaktors nach einer Kühlzeit von 2 Jahren bei 690 g Spaltprodukten je Liter Glas eine 4,6-fache Vergrößerung der Oberfläche erforderlich, wenn der Glaszylinderdurchmesser 25 cm und die Kühlluftgeschwindigkeit 3 m/s ist (siehe eingezeichneter Linienzug).

Bei freier Konvektion können von der Behälteroberfläche bis zu $0,1 \text{ W/cm}^2$ abgeführt werden. Die Wärme-Quellstärke wäre dazu je nach Glaszylinderdurchmesser zu begrenzen auf $0,05$ bis $0,08 \text{ W/cm}^3$ Glas.

2.4 Wärmetransport im Behälter

2.4.1 Temperaturdifferenz im Glaszylinder

In einem gleichmäßig mit einer Wärme-Quellstärke belegten Zylinder wird die Temperaturdifferenz berechnet aus:

$$\int_{t_1}^{t_0} \lambda dt = Q \cdot \frac{d^2}{16}$$

$$\lambda \left(\frac{\text{kcal}}{\text{cm} \cdot \text{h} \cdot \text{grd}} \right) = \text{Wärmeleitfähigkeit des Quellmaterials}$$

$$Q \left(\frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{cm}^3} \right) = \text{Quellstärke}$$

$$d \text{ (cm)} = \text{Zylinderdurchmesser}$$

Setzt man statt der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit λ einen mittleren Wert $\bar{\lambda}$ ein, so wird:

$$\Delta t = \frac{Q \cdot d^2}{\bar{\lambda} \cdot 16}$$

Für die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Glas-Spaltproduktoxid-Gemisches wurde gesetzt:

$$\bar{\lambda} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{m h grd}}$$

Dieser Wert entspricht ungefähr der Wärmeleitfähigkeit von Glas.

Die Temperaturdifferenz im Glaszylinder kann Abb. 2.4.-1 entnommen werden. Bei einer Wärme-Quellstärke von $0,05 \text{ W/cm}^3$ beträgt sie in einem Glaszylinder mit dem Durchmesser 20 cm ca. 100°C .

Bei einer Außenwandtemperatur von 80°C wird die Temperatur an der Innenwand des Transportbehälters etwa 100°C betragen. Zur Aufrechterhaltung des Temperaturgefälles und bei Beachtung der höchstzulässigen Temperatur im Glaszylinder von 800°C darf daher die Temperaturdifferenz im Glaszylinder nie größer als 700°C sein.

2.4.2 Wärmetransport im Ringspalt zwischen Glaszylinder und Behälterinnenwand

Die Glaszylinder und der Transportbehälter werden nicht so maßhaltig gefertigt werden können, daß die Außenwand des Glaszylinders exakt an die Innenwand des Transportbehälters anschließt. Die in den Glaszylindern entstehende Wärme muß daher durch einen Ringspalt an die Innenwand des Transportbehälters geleitet werden.

Gut realisierbar dürfte ein 1 cm dicker Ringspalt sein. Es wird untersucht, wie groß die Wärmemenge ist, die dabei ohne besondere Maßnahmen transportiert werden kann.

Der Wärmeübergang durch eine Schicht geschieht durch Strahlung, Leitung und Konvektion.

Wärmestrahlung:

$$W_{St} = \alpha_{St} F (t_i - t_a)$$

$$\alpha_{St} = C_{12} \cdot a_s$$

Der Temperaturfaktor a_s wird für $t_a = 100^\circ\text{C}$ aus (4), Ka5, entnommen.

$$C_{12} = \epsilon_{12} C_s$$

Mit

$$\epsilon_1 = \epsilon_i = 0,64$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_a = 0,8$$

$$F_1/F_2 \approx 1$$

wird

$$\epsilon_{12} = 0,56 \quad (4), \text{Ka7}$$

und

$$C_{12} = 2,73$$

Wärmeleitung und Konvektion:

$$W_{1K} = \lambda_{1K} \frac{2\pi l (t_i - t_a)}{\ln d_a/d_i} = K\lambda \frac{2\pi l (t_i - t_a)}{\ln d_a/d_i} \quad (4), \text{ Fe1}$$

Der Faktor K gibt dabei den Einfluß der Konvektion beim Wärmetransport an. Nach (4), Fe2, Bild 1, ist bei geringen Temperaturdifferenzen und kleinen Spaltweiten $K = 1$.

In Abb. 2.4.-2 sind die Wärmemengen aufgetragen, die in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz im Ringspalt infolge Strahlung, Leitung und Konvektion transportiert werden können.

Abb. 2.4.-1 ist zu entnehmen, wie groß die Wärmequellstärke bzw. wie gering die Temperaturdifferenz im Ringspalt sein darf, wenn die Nachwärme der Spaltprodukte ohne besondere Maßnahmen durch einen 1 cm dicken Ringspalt an die Innenwand des Behälters transportiert werden soll.

Bei Verringerung der Ringspaltweite wird der Wärmeübergang infolge

- Strahlung ungefähr gleich bleiben,
- Leitung ungefähr umgekehrt proportional zur Ringspaltweite ansteigen,
- Konvektion abnehmen.

Bei einem 1 mm dicken Spalt ist die infolge Leitung transportierte Wärmemenge um etwa das Zehnfache angestiegen. Sie ist dann der größte Anteil beim Wärmetransport.

Literaturangaben zu Teil 2

- (1) Swindell, G.E., Sicherheitsvorschriften für die
Beförderung radioaktiver Stoffe,
Atom und Strom, Jg. 15, Nr. 9, September 1969
- (2) "Regulations for the Safe Transport of Radioactive
Materials",
IAEA, Vienna, revised Edition, 1967
- (3) Gupta, D., Heller, F., Schröder, R., "The Amounts
of Fission Product Nuclides Produced in ^{239}Pu -Fuelled
Fast Reactors and the Related Heat Generation after
Shut-Down", KFK 722 (1968)
- (4) VDI-Wärmeatlas,
VDI-Verlag, Düsseldorf

Teil 3: Sicherheit beim Transport

3.1 Einführung

Die Glaszylinder gelten nach der Klassifizierung der IAEA wegen des hohen Gehaltes an radioaktiven Spaltprodukten als "radioaktive Großquellen".

Für diese gelten die folgenden Transportvorschriften:

- Die allgemeinen Forderungen an Verpackungen (1), C-2.1,
- die zusätzlichen Forderungen an Typ A- und Typ B-Verpackungen (1), C-2.2. und C-2.3. sowie
- die zusätzlichen Forderungen an Versandstücke, die radioaktive Großquellen enthalten (1), C-2.4.

Während in den allgemeinen Forderungen Prinzipien für Konstruktion und Auslegung der Behälter aufgeführt sind, sind in den zusätzlichen Forderungen an Typ A- und Typ B-Verpackungen im wesentlichen die Tests enthalten, denen die Behälter unterzogen werden müssen (s.u.).

Die zusätzlichen Forderungen an Behälter für radioaktive Großquellen nehmen Bezug auf die von den radioaktiven Materialien im Inneren des Behälters entwickelte Wärme sowie auf deren Ableitung an die Umgebung.

3.2 Beim Entwurf zugrundezulegende Belastungen

3.2.1 Der "Größte anzunehmende Unfall" (GaU)

Als größter anzunehmender Unfall wird von den für die Festlegung von Transportvorschriften zuständigen Organisationen nachstehende Folge von Schadensfällen angesehen:

Aufprall auf ein festes Hindernis (anzunehmende Geschwindigkeit ca. 50 km/h), Sturz des Behälters auf einen Stempel (Kilometerstein o.ä.), (Fallhöhe ca. 1 m) sowie Ausbrennen eines Tankwagens mit Kerosin.

3.2.2 Simulierung des GaU

Die bei dem Unfall auftretenden Belastungen werden durch die nachfolgenden Tests hinreichend genau simuliert. (1), Annex IV, I-4.

Nachdem der Behälter den kumulativen Folgen dieser Tests ausgesetzt worden ist, muß

1. seine Abschirmwirkung soweit erhalten sein, daß in 1 m Entfernung von der Oberfläche eine Dosisleistung von 1000 mrem/h nicht überschritten wird und
2. seine Beschaffenheit derartig sein, daß vom radioaktiven Inhalt nichts nach außen gelangen oder verstreut werden kann.

Bei der Beförderung des Behälters als "Geschlossene Ladung", d.h. bei ausschließlicher Nutzung eines Fahrzeuges, kann das Fahrzeug als Bestandteil der Verpackung angesehen werden. (1), Fußnote 2

In einigen Fällen können Berechnungen anstelle von Tests zur Ermittlung der Unfallfolgen herangezogen werden.

3.2.2.1 Falltest

Sturz des Behälters aus 9 m Höhe mit seiner schwächsten Stelle auf eine Betonplatte, so daß die maximale Zerstörung gewährleistet wird. Die Betonplatte soll das 10-fache Behältergewicht aufweisen und mit 12 mm Stahl armiert sein.

3.2.2.2 Eindringtest

Sturz des Behälters aus 1 m Höhe auf einen Stahlzylinder mit 15 cm Durchmesser und mindestens 20 cm Höhe, so daß der schwächste Punkt getroffen wird. Ein längerer Zylinder ist einzusetzen, wenn dadurch eine größere Zerstörung zu erreichen ist.

3.2.2.3 Feuertest

Der Behälter wird einem Schadensfeuer unterzogen. Das Feuer soll eine strahlende Umgebung von 800°C mit einem Emissionskoeffizienten von 0,9 und einem Absorptionskoeffizienten von 0,8 über 30 Minuten bilden. Der Behälter muß dem Feuer ungeschützt ausgesetzt sein. Dieses soll durch Verbrennung von Petroldestillat mit 330°C Endsiedepunkt, 46°C Flammpunkt und einem Heizwert von 11100 - 11700 kcal/kg erzeugt werden. Dabei müssen alle Seiten des Behälters von Flammen mit 0,7 bis 3,0 m Dicke umgeben sein. Erst drei Stunden nach dem Feuertest darf eine künstliche Kühlung von außen angebracht werden, es sei denn, es kann gezeigt werden, daß die Innentemperatur schon vorher zu fallen beginnt.

3.2.3 Zusätzlich zu betrachtende Beanspruchungen

3.2.3.1 Drucktest

Hierbei wird angenommen, daß der Behälter von einem einstürzenden Gebäude begraben wird und dabei einem starken Druck ausgesetzt und von einer gut wärmeisolierenden Masse vollständig umgeben wird.

Der Behälter muß daher 24 h mit seinem 5-fachen Eigengewicht oder 1300 kg/m^2 nach seiner vertikalen Projektion belastet werden.

Außerdem ist zu überprüfen, ob infolge der im Inneren der Transportbehälter erzeugten Wärme die Wirksamkeit der Verpackung beeinträchtigt werden könnte.

3.2.3.2 Eintauchtest

Der Behälter muß in 15 m tiefem Wasser leckdicht sein.

3.2.3.3 Ausfall des Kühlgebläses

Wenn zur Ableitung der Wärme von der Behälter-Oberfläche eine Zwangskühlung notwendig ist, kann die Möglichkeit, daß das Gebläse ausfällt, nicht ausgeschlossen werden. Für diesen Fall ist zu untersuchen, ob und nach welcher Zeit eine Beeinträchtigung der Wirksamkeit der Verpackung eintritt.

3.3 Unfallfolgen

3.3.1 Aufprall auf ein festes Hindernis

Es wird eine Aufprallgeschwindigkeit von ca. 13 m/sec zugrundegelegt (entsprechend einer Fallhöhe von 9 m). Die dabei auftretende Verzögerung dürfte in der Größenordnung von mehreren hundert g liegen.

Es sind verschiedene Konzeptionen denkbar, die gewährleisten, daß bei dieser Belastung vom radioaktiven Inhalt nichts nach außen gelangen oder verstreut werden kann:

1. Die Ummantelung des Glaszylinders wird so dimensioniert, daß sie in jedem Falle unzerstörbar ist und somit den radioaktiven Inhalt immer dicht umschließt. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Hülle eine verlorene Verpackung ist und für jeden Glaszylinder neu angefertigt werden muß.
2. Der Glaszylinder wird im Transportbehälter so gelagert, daß die Stoßkräfte von der Lagerung aufgenommen werden. Dies wäre durch z.B. Federn oder Puffer im Transportbehälter möglich. Der Glaszylinder wird nicht zerstört.

3. Der Transportbehälter wird so konstruiert, daß er in jedem Falle dicht bleibt. Trotz einer Zerstörung des Glaszylinders kann der radioaktive Inhalt nicht nach außen gelangen.

4. Der Transportbehälter wird auf dem Fahrzeug so befestigt, daß von der Halterung die Stoßkräfte so abgebremst werden, daß der Glaszylinder nicht zerstört wird.

In der nachfolgenden Tabelle sind Vor- und Nachteile der verschiedenen Konzepte zusammengefaßt.

Tabelle 3.3. - 1

Konzeption	1	2	3	4
Glaszylinder - Ummantelung	-	+	+	+
Transportbehälter - Innenraum	+	-	+ (-)	+
Reinigung des Transportbehälters	+	-	- (+)	+
Dichtung, Deckelkonstruktion	+	+ (-)	-	+
Wärmeabfuhr	+	-	+	+
Handhabung beim Be- und Entladen	+	+ -	-	+ (-)
Befestigung auf dem Fahrzeug	+	+	+	-

+ Einfach, unkompliziert

- schwierig, kompliziert

Die günstigste Lösung des Problems wird es sein, die Konzeptionen 1, 2 und 4 so miteinander zu verbinden, daß die Zerstörung des Glaszylinders in jedem Falle vermieden werden kann.

Mit dieser Voraussetzung bleibt lediglich nachzuprüfen, wie stark die Abschirmwirkung des Transportbehälters infolge des 9 m-Falltests verringert wird. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Deckel so konstruiert ist, daß er sich beim Aufprall nicht löst (siehe 3.2.2).

Während des Transports ist die Dosisleistung in 2 m Entfernung von der Außenseite des Fahrzeugs maximal $10 \frac{\text{mrem}}{\text{h}}$. Dann ist die Dosisleistung in 1 m Entfernung von der Oberfläche des Transportbehälters ca. $40 \frac{\text{mrem}}{\text{h}}$ (siehe Teil 1).

Nach dem Unfall darf die Dosisleistung mithin höchstens um den Faktor 25 ansteigen. Das bedeutet, daß die Abschirmung um nicht mehr als ca. 1,4 Zehntelwertsdicken geringer werden darf.

Zur Betrachtung der bei einem Unfall auftretenden Formänderung des Transportbehälters wird der 9 m-Falltest zugrundegelegt:

Beim freien Fall des Behälters mit dem Gewicht G aus der Höhe $h = 9 \text{ m}$ tritt beim Aufprall eine Energie

$$A = h \cdot G = 9 \cdot G \quad (\text{kp m})$$

auf. Im folgenden wird von der erschwerenden Annahme ausgegangen, daß der Behälter direkt auf die Betonplatte prallt, d.h. daß er vorher nicht bereits durch das Fahrzeug und die Halterung auf dem Fahrzeug abgebremst worden ist.

Dann muß der größte Teil der Aufprallenergie durch Formänderung (Stauchung) des Abschirmmaterials verbraucht werden.

Die exakte analytische Ermittlung der Stauchung ist nur schwer möglich. Notfalls müssen daher Tests, eventuell mit verkleinerten Modellen, durchgeführt werden.

Eine überschlägige Berechnung kann mit Hilfe der Formänderungsarbeit bei technischen Formgebungsverfahren durchgeführt werden. Die Formänderungsarbeit muß gleich sein der Aufprallenergie:

$$A = \int_0^s F K_f \eta_f ds = 9 \cdot G$$

- F (cm^2) Gestauchte Fläche
 K_f ($\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$) Formänderungs-Festigkeit
 η_f (/) Formänderungs-Wirkungsgrad

Mit der Annahme, die gestauchte Fläche sowie die Materialeigenschaften seien konstant, folgt daraus:

$$s = \frac{9 \cdot G}{F \cdot K_f \eta_f}$$

- s (cm) Stauchung

Die Formänderungsfestigkeit von Stahl liegt je nach der Größe der Verformung zwischen 3000 und 9000 $\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$. Der Formänderungswirkungsgrad dürfte zwischen 0,2 und 0,9 liegen. (2), S: 755-758

Mit $K_f = 4000 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ und $\eta_f = 0,6$ wird

$$s \approx \frac{G}{F} \cdot 0,4 \text{ (cm).}$$

Z.B. beträgt demnach die Stauchung bei einem Behälter, der 10^4 kp wiegt und eine Aufprallfläche von 10^4 cm² hat (d.h. Sturz auf die Stirnfläche), ungefähr 0,4 cm.

Eine Schwächung der Abschirmwirkung des Behälters ist daher nicht zu erwarten, denn die ohnehin nur geringe Stauchung erfolgt über die gesamte Zylinderlänge. Die Zerstörung des Transportbehälters kann ausgeschlossen werden.

Bei einem Sturz auf die Behälterkante sind die Verhältnisse noch unübersichtlicher. Hierbei wäre die Stauchung zwar wesentlich größer, jedoch nicht so groß, daß die Abschirmung so weit geschwächt wird, daß die Dosisleistung außerhalb des Behälters auf einen unzulässigen Wert ansteigt.

In diesem Zusammenhang erscheint es angebracht, die Behälterkanten nicht oder nur wenig abzurunden, damit an diesen Stellen ausreichend Material zur Stauchung vorhanden ist.

Beim Aufprall des Behälters in axialer Richtung muß, wenn der Behälter an seiner Mantelfläche verklemmt wird, die gesamte Aufprallenergie von Deckel und Behälterinhalt (ca. 30 - 50 Mpm) von der Deckelverschraubung aufgenommen werden. Diese kann so ausgelegt werden, daß die bei dieser Belastung auftretenden Dehnungen entweder im elastischen oder im plastischen Bereich liegen. Im ersten Fall ist eine sehr starke Dimensionierung der Schrauben erforderlich. Wenn jedoch plastische, also bleibende, Dehnungen zugelassen werden sollen, muß der Deckel so konstruiert werden, daß seine Abschirmwirkung auch nach einer Verschiebung erhalten bleibt, d.h. daß keine Spalte entstehen, durch die radioaktive Strahlung gelangen könnte.

3.3.2 Sturz auf einen Zylinder

Die Aufprallenergie beim Sturz aus 1 m Höhe ist

$$A = 1 \cdot G \quad (\text{kp m})$$

Da die Aufprallfläche wesentlich kleiner ist als beim Aufprall auf ein festes Hindernis, ist der Stauchdruck insgesamt größer. Eine Schwächung der Abschirmung um 1,4 Zehntelwertsdicken (ca. 10 cm) ist jedoch keinesfalls zu erwarten. Die Dosisleistung bliebe auch nach diesem Unfall unterhalb der zulässigen Grenze.

3.3.3 Schadensfeuer

Die bei einem Feuer mit den unter 3.2.2.3 genannten Bedingungen auftretende Erwärmung wird mit Hilfe des "Binder-Schmidt-Verfahrens" grafisch ermittelt. (3), Ed 16-18

Aus Teil 1 (Aktivitäten und Strahlenschutzrechnung) und Teil 2 (Nachwärme und Wärmeübergang) werden die folgenden Größen zugrundegelegt:

Glaszylinderdurchmesser	d = 20 cm
Transportbehälter-Außendurchmesser	D = 95 cm
Wärme-Quellstärke	Q = 4,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{cm}^3 \text{h}}

Die Transportbehälter-Oberfläche ist glatt. Die Wärmeleitung erfolgt bei freier Konvektion über die Zylinder-Mantelflächen. Die Wärmeleitung über die Zylinder-Grundflächen wird vernachlässigt. Die Temperatur an der Transportbehälter-Oberfläche ist bei Beginn des Feuers 80°C.

Die Wärmeübergangszahl durch Strahlung an der Oberfläche wird berechnet nach

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t}$$

$$q = \epsilon_w \cdot \epsilon_g \cdot C_s \left[\left(\frac{T_g}{100^\circ\text{K}} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100^\circ\text{K}} \right)^4 \right]$$

$q \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}} \right)$ = die je m^2 und Stunde an der Oberfläche übertragene Wärmemenge

$\epsilon_w (\text{ } / \text{)}$ = Emissionsverhältnis der Wand

$\epsilon_g (\text{ } / \text{)}$ = Emissionsverhältnis des Gases

$C_s \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}} \right)$ = Strahlungszahl des schwarzen Körpers

$T_g (\text{ } ^\circ\text{K} \text{)}$ = Gastemperatur

$T_w (\text{ } ^\circ\text{K} \text{)}$ = Wandtemperatur

Mit den vorgegebenen Werten wird errechnet

$$\alpha_{\text{str}} = 59 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h grad}}$$

Unter Berücksichtigung der durch Leitung übertragenen Wärmemenge ist

$$\alpha_{\text{ges}} = 65 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h grad}}$$

Zur Ermittlung des Temperaturgradienten an der Oberfläche wird der Abstand des "Richtpunktes" errechnet:

$$s = \frac{\lambda}{\alpha}$$

λ ($\frac{\text{kcal}}{\text{m h grd}}$) = Wärmeleitfähigkeit des Transportbehälter-Materials

Für Stahl ist

$$\lambda = 50 \frac{\text{kcal}}{\text{m h grd}}$$

Damit ist

$$s = 0,77 \text{ m}$$

An der Innenseite des Behälters ist während des Feuers der Temperaturgradient als zeitlich konstant anzunehmen.

$$\frac{dt}{dx} = \frac{Q}{F \lambda}$$

Q ($\frac{\text{kcal}}{\text{h}}$) = im Glaszylinder erzeugte Wärmemenge

F (m^2) = Innenfläche des Transportbehälters

Es ergibt sich der Temperaturgradient

$$\frac{dt}{dx} = 41,8 \frac{\text{grd}}{\text{m}}$$

Zur Durchführung des "Binder-Schmidt-Verfahrens" wird die Behälterwand (Gesamtstärke $x = 37$ cm) in vier Schichten aufgeteilt:

$$\Delta x = 9,25 \text{ cm}$$

Damit wird die Zeitdifferenz zwischen zwei Temperaturlinien errechnet:

$$\Delta \tau = \frac{(\Delta x)^2}{2a}$$

$a \left(\frac{\text{m}^2}{\text{h}} \right)$ = Temperaturleitzahl

Für Stahl ist $a = 0,0585 \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$

Die Zeitdifferenz ist mit den gegebenen Werten:

$$\Delta \tau = 4,4 \text{ min}$$

Es müssen also 7 Temperaturlinien konstruiert werden, um die Erwärmung nach einem 30 Minuten andauernden Feuer zu ermitteln.

Dabei ergeben sich die folgenden Temperaturen:

Behälter-Oberfläche	ca. 270°C
Behälter-Innenwand	ca. 130°C

Nach weiteren 30 Minuten Feuer hätten sich folgende Temperaturen eingestellt:

Behälter-Oberfläche	ca. 350°C
Behälter-Innenwand	ca. 230°C

Unter Berücksichtigung der im Behälter vorhandenen Temperaturdifferenzen läge die Temperatur im Zentrum des Glaszylinders bei einer Innenwandtemperatur von 130°C noch unterhalb der zulässigen Höchstgrenze von 800°C .

Wird, wie bisher vorausgesetzt wurde, ein reiner Stahlbehälter benutzt, dann tritt infolge des Schadensfeuers keine Beeinträchtigung der Abschirmwirkung des Behälters auf.

Bei Verwendung von Blei-Stahl-Verbundbehältern würde das Blei wahrscheinlich schmelzen, zumal wegen des geringeren Wärmespeichervermögens von Blei die Temperaturen noch mehr ansteigen würden als bei reinen Stahlbehältern.

Nach Verlöschen des Feuers muß der Behälter ggf. bis zum Einsetzen einer Zwangskühlung eine gewisse Zeit (für den Test werden 3 h vorgesehen) liegenbleiben. Hierfür wird der Temperaturverlauf ermittelt.

Zur Durchführung des "Binder-Schmidt-Verfahrens" wird davon ausgegangen, daß das Feuer nach 30 min erloschen ist. Die Umgebungstemperatur ist wieder auf 38°C abgesunken. Dann ist die Wärmeübergangszahl infolge Konvektion

$$\alpha = 6,6 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h grad}}$$

und der Richtpunktabstand

$$s = \frac{\lambda}{\alpha} = 7,55 \text{ m}$$

Damit ergibt sich der Temperaturgradient an der Oberfläche

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\Delta t}{s} = 30,5 \frac{\text{grad}}{\text{m}}$$

An der Innenwand des Behälters ist der gleiche Temperaturgradient wie beim Feuer:

$$\frac{dt}{dx} = 41,8 \frac{\text{grd}}{\text{m}}$$

Mit der Schichtdicke

$$\Delta x = 0,123 \text{ m}$$

ist der Zeitintervall zwischen zwei Temperaturlinien

$$\Delta \tau = 7,8 \text{ min}$$

Es müssen mithin 23 Temperaturlinien konstruiert werden.

Es ergibt sich folgender Temperaturverlauf:

Außenseite: In den ersten 40 Minuten nach Verlöschen des Feuers rasche Abkühlung bis auf ca. 190°C , danach langsame Abkühlung um stündlich ca. 6°C . Drei Stunden nach Verlöschen des Feuers ist die Temperatur 175°C .

Innenwand: Anstieg der Temperatur in den ersten 40 Minuten bis auf ca. 200°C . An diesem Punkt ist das ursprüngliche Temperaturgefälle zwischen Innen- und Außenwand eingetreten. Die Temperatur sinkt daher entsprechend der Außentemperatur und beträgt 3 Stunden nach dem Feuer 185°C .

Die Temperaturen in der Abschirmung sind für verschiedene Zeitpunkte in Abb. 3.3.-1 aufgetragen.

Damit ergäbe sich infolge des Schadensfeuers folgende Maximaltemperatur im Glaszylinder:

Behälterinnenwand	$t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperaturdifferenz im Ringspalt ($s=10 \text{ mm}$)	$t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperaturdifferenz im Glaszylinder	$t = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	<hr/>
t_{max}	$= 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Die Maximaltemperatur läge mithin unterhalb der bisher angenommenen zulässigen Temperatur von $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und damit in einem sicheren Bereich.

Bei einem gerippten Zylinder ist während des Feuers die Wärmeübergangszahl

$$\alpha \approx 80 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h } \text{grd}}$$

und damit der Richtpunkt Abstand

$$s \approx 0,62 \text{ m.}$$

Der Temperaturgradient an der Oberfläche wird also größer und die Außenwand des Behälters wird sich schneller erwärmen als beim glatten Zylinder. Die Rückwirkung auf die Innenwand ist jedoch, besonders zu Anfang, gering.

Andererseits kühlt der Behälter nach Verlöschen des Feuers schneller wieder ab. Da in diesem Stadium die höchste Temperatur an der Innenwand auftritt, kann angenommen werden, daß diese bei einem berippten Behälter nicht höher sein wird als bei einem glatten.

3.3.4 Ausfall des Kühlgebläses

Wie aus Abb. 2.3.-1 zu entnehmen ist, wird zur Kühlung eines glatten Zylinders bei einer Wärmequellstärke von $4,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kcal}}{\text{cm}^3 \text{ h}} = 0,051 \frac{\text{W}}{\text{cm}^3}$ eine Kühlluftgeschwindigkeit von 5 m/sec benötigt. Fällt das Kühlgebläse aus, dann wird der Behälter sich erwärmen.

Ein Teil der von den Spaltprodukten entwickelten Wärme wird vom Behälter gespeichert, der andere Teil wird von der Oberfläche abgeführt:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t_1 + \alpha \cdot F \cdot \Delta t_2$$

$Q \left(\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right)$ Nachwärme der Spaltprodukte

$c \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kggrd}} \right)$ Spezifische Wärme des Abschirmmaterials

$G \text{ (kg)}$ Gewicht der Abschirmung

$\Delta t_1 \text{ (grd)}$ Aufheizung der Abschirmung

$F \text{ (m}^2\text{)}$ Behälter-Oberfläche

$\alpha \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h grd}} \right)$ Wärmeübergangszahl

$\Delta t_2 \text{ (grd)}$ Temperaturdifferenz zwischen Behälter-Oberfläche und Umgebung

$$\Delta t_1 = \frac{Q - \alpha F \Delta t_2}{G \cdot c}$$

Mit

$$\alpha = 4,6 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h} \text{ grad}}$$

$$\Delta t_2 = 42 \text{ grad}$$

$$c = 0,11 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ grad}}$$

ergibt sich eine anfängliche Aufheizung des Transportbehälters

$$\Delta t_1 = 1,4 \frac{\text{grad}}{\text{h}} .$$

Mit steigender Temperatur wird die stündliche Erwärmung geringer.

Bei 132°C ist der Gleichgewichtszustand erreicht, bei dem die von den Spaltprodukten entwickelte Wärme von der Oberfläche ohne Zwangskühlung abgeführt wird. Die Temperatur an der Behälter-Innenwand ist dann etwa 140°C.

3.3.5 Einsturz eines Gebäudes als Folge des Aufpralls

Hierbei können zwei Beanspruchungsarten auftreten:

Erwärmung infolge vollständiger Wärmeisolierung

Druckbelastung durch einstürzendes Bauwerk

Wenn der Behälter völlig von der Umgebungsluft isoliert wird, muß die gesamte Nachwärme der Spaltprodukte von der Abschirmung aufgenommen werden:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t$$

$$\Delta t = 2,4 \frac{\text{grad}}{\text{h}} .$$

Nach einem Tag hätte sich der Behälter um ca. 60 grd erwärmt. Bei 80°C Behälter-Außentemperatur zur Zeit des Unfalls wäre mithin die Temperatur auf 140°C angestiegen. Die Wirksamkeit der Verpackung ist damit noch nicht eingeschränkt.

Zur Simulierung der Druckbelastung soll der Behälter das 5-fache Eigengewicht oder 1300 kp/m² aushalten. Bei dem hier vorliegenden Behälter ist die erste Forderung die schwerere.

Unter der Annahme, der Behälter wiege 10 Mp und sein Durchmesser sei 1 m, ist die vorgeschriebene Druckbelastung

$$p = 67 \frac{\text{Mp}}{\text{m}^2} = 6,7 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

in der Abschirmung.

Für einen Stahlbehälter stellt diese Belastung kein Problem dar.

3.3.6 Sturz in ein Gewässer

In 15 m tiefem Wasser herrscht am Behälter ein Druck von 1,5 atü.

Es kann vorausgesetzt werden, daß die Glaszylinder-Ummantelung beim Unfall nicht beschädigt wird. Da diese vor dem Transport dicht geschweißt wird, bleibt sie bei geeigneter Konstruktion auch unter dem o.a. Außenüberdruck leckdicht. Es wird daher keine Radioaktivität austreten.

Literaturangaben zu Teil 3

- (1) "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials",
IAEA, Vienna, revised Edition 1967
- (2) Hütte I, 28. Auflage, Verlag W.Ernst & Sohn, Berlin
- (3) VDI-Wärmeatlas,
VDI-Verlag Düsseldorf 1963

Teil 4.: Transportkosten und Transportmodus

4.1 Schätzung der zu transportierenden Spaltproduktmengen

4.1.1 Überblick

Die Menge der anfallenden Spaltprodukte ist direkt proportional der nuklear erzeugten elektrischen Energie. Bei einem durchschnittlichen Anlagen-Wirkungsgrad der Kernkraftwerke von 0,38 entstehen pro GW erzeugter elektrischer Leistung jährlich 1000 kg Spaltprodukte.

Die Schätzungen der in der Bundesrepublik installierten elektrischen Kernkraftwerksleistung schwanken für 1980 zwischen 15 und 40 GW (1). Legt man für 1980 eine erzeugte Leistung von 25 GW zugrunde, (2) und (3), so würden mithin 25 to Spaltprodukte anfallen und müßten nach der Abklingzeit von ca. 3 Jahren transportiert werden.

Bei einem durchschnittlichen Anteil von 10 kg Spaltprodukten je Glaszylinder müßten 1983 ungefähr 2500 Glaszylinder zur Endlagerstätte transportiert werden, wenn alle bestrahlten Brennstoffe in der BRD wiederaufgearbeitet würden.

4.1.2 Zugrundegelegte Werte

Die vorliegende Berechnung beschränkt sich auf den Transport der in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) anfallenden Spaltprodukte.

Die Anlage soll zunächst einen Durchsatz von 40 ja to Uranoxid haben, der später ggfs. geringfügig erhöht wird (4). Geht man davon aus, daß 1 GW installierte elektrische Leistung eine Wiederaufarbeitung von jährlich 40 to Uranmetall erforderlich macht (3), so wird in der WAK der Brennstoff aufgearbeitet, der eine Leistung von 1 bis ca.2 GW erzeugt hat. Es wird also zunächst 1 to, später 1,5 bis 2 to Spaltprodukte pro Jahr anfallen.

Im Versuchsmaßstab sollen die Spaltprodukte in der Pilot-Anlage VERA verfestigt werden. Die routinemäßige Verarbeitung der Spaltprodukte zu Boro-Silicat-Gläsern soll in der HAVEL (Hochaktiv-Verglasung und Lagerung) erfolgen.

4.2 Glaszylinder

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es insbesondere beim Transport abzuschirmender Güter am günstigsten, möglichst große Einheiten zu wählen.

Der Durchmesser der Glaszylinder und die Konzentration der Spaltprodukte im Glas werden begrenzt durch die Wärmemenge, die bei der Endlagerung an das Salz abgegeben werden kann. Mit diesen Werten kann die Mindest-Abklingzeit und damit die Abschirmung ermittelt werden.

Die Länge der Glaszylinder wird bestimmt durch die Tragfähigkeit der Schachthanlage der ASSE (9,8 Mp). Mit Kenntnis der für einen Glaszylinder notwendigen Abschirmung kann hieraus die maximale Länge der Glaszylinder berechnet werden. Aus verfahrenstechnischen Gründen werden die in der VERA hergestellten Glaszylinder ungefähr 60 cm lang werden.

Unter Berücksichtigung der anfallenden Daten werden der Berechnung die folgenden Werte zugrunde gelegt:

Glaszylinder-Durchmesser	20 cm
Anteil der Spaltprodukte im Glas	460 g/l
Glaszylinder-Länge	60 und 100 cm
Abklingzeit	3 Jahre

Damit enthält ein Glaszylinder 8,8 bzw. 14,5 kg Spaltprodukte.

Die folgende Tabelle enthält die Anzahl der Glaszylinder, die in Abhängigkeit vom Durchsatz der WAK und der Glaszylinderlänge pro Jahr hergestellt und transportiert werden müssen.

Durchsatz/Jahr (to)	40	60	80
Spaltprodukte/Jahr (to)	1	1,5	2
L = 60 cm	115	170	230
L = 100 cm	70	105	140

4.3 Transportbehälter

4.3.1 Anzahl und Anordnung der Glaszylinder

Die Glaszylinder können in verschiedenen Behälterttypen transportiert werden:

1. In Einzelbehältern, im folgenden kurz Ebh genannt, d.h. je Transportbehälter ein Glaszylinder. Auf einem Fahrzeug können jedoch mehrere Ebh befördert werden.
2. In Sammelbehältern (Sbh), d.h. mehrere Glaszylinder in einem Transportbehälter. Auch hiervon können, soweit Größe und Gewicht der Sbh es zulassen, mehrere auf einem Fahrzeug transportiert werden.
 - a) 2 bzw. 3 Glaszylinder hintereinander (L 2 bzw. L 3). Bei einer Anordnung von mehr als 3 Glaszylindern hintereinander wird der Sbh so lang, daß das Be- und Entladen verhältnismäßig schwierig wird.

- b) 3 bzw. 7 Glaszylinder in dreieckiger bzw. hexagonaler Packung nebeneinander (Q 3 bzw. Q 7). Diese Anordnung der Glaszylinder ist die gewichtsmäßig günstigste Lösung. Sie bringt jedoch einige Schwierigkeiten mit sich, auf die weiter unten eingegangen wird.
- c) Nebeneinander in einer Reihe können beliebig viele Glaszylinder angeordnet werden (M 2, M 3 usw.). Behälter mit dieser Anordnung sind leichter als L 2- bzw. L 3-Behälter, jedoch schwerer als Q 3- bzw. Q 7-Behälter. Da bei ihnen ähnliche Schwierigkeiten wie bei den letztgenannten auftreten, können sie nicht als Alternative angesehen werden.

4.3.2 Abschirmung, Maße, Gewichte

Bei der Ermittlung der benötigten Wandstärken wird wie in Teil 1 davon ausgegangen, daß alle Behälter eine reine Stahlabschirmung besitzen. Zugrundegelegt werden die Werte aus Abb. 1.3.1 bis 1.3.6 bei dreijähriger Kühlzeit.

Es wird angenommen, daß die in der WAK aufzuarbeitenden Brennstoffe überwiegend von Leichtwasserreaktoren kommen.

Zur Lagerung und Federung der Glaszylinder im Transportbehälter sowie für eine Vorrichtung am Glaszylinder zum Be- und Entladen werden bei der Bestimmung der Maße und Gewichte der Behälter jeweils 10 cm zu der Länge der Glaszylinder zugegeben.

In Tabelle 4.3.1 sind die wichtigsten Daten der Behältertypen angegeben. Bei den Maßen und Gewichten ist eine zur Wärmeabfuhr eventuell erforderliche Verrippung nicht berücksichtigt.

Es wird vorausgesetzt, daß der Ringspalt zwischen Glaszylinder und Transportbehälter-Innenwand jeweils 5 mm dick ist.

Außerdem ist die Anzahl der Behälter und daraus resultierend die Anzahl der Glaszylinder angegeben, die auf einem Straßenfahrzeug mit einer maximalen Nutzlast von 23 bis 24 Mp transportiert werden können. Für größere Nutzlasten kämen Spezialtransporte mit z.B. Tiefladern infrage. Dabei wird jedoch im allgemeinen ein starker Anstieg der Kosten festgestellt. (Bei Bahntransporten kann die maximale Nutzlast je nach der Art des verwendeten Bundesbahnwagens bis zu 89 Mp sein (SSylms-Wagen)).

Unter spezifischem Abschirmgewicht (letzte Spalte) wird das Behältergewicht pro kg Spaltprodukte verstanden.

4.3.3 Prinzipieller Aufbau

Wegen der Begrenzung der Tragfähigkeit der ASSE-Schachtanlage auf 9,8 Mp müssen die Glaszylinder aus Transportbehältern, die schwerer sind, - und das sind alle Sammelbehälter - an der ASSE übertage in Entladebehälter umgeladen werden. Dazu bleibt der Transportbehälter auf dem Transportfahrzeug, der Entladebehälter wird auf den Transportbehälter gesetzt und ein Glaszylinder wird in den Entladebehälter gezogen.

Für das Be- und Entladen der Sbh sind verschiedene Verfahren denkbar:

1. Der Behälter besitzt oben und unten Be- bzw. Entladeöffnungen. Dann könnte er von unten ohne zusätzliche Abschirmung beladen werden und brauchte zum Entladen nicht gedreht zu werden.
2. Der Behälter hat nur an einer Seite eine bzw. mehrere Be-u. Entladeöffnungen. Dann müßte er entweder von oben beladen werden, wozu eine heiße Zelle notwendig ist, oder er wird von unten beladen und müßte danach zum Entladen um 180° gedreht werden.

Einzelbehälter dagegen brauchten nur eine Be- und Entladeöffnung an ihrer Unterseite.

Tabelle 4.3.1 - Grunddaten der möglichen Behältertypen

Typ	Glaszyl.-	Abschirmdicke		Maße (cm) D x H bzw. L x B x H	Gewicht (Mp)	Anzahl der		Spaltprodukte pro Behälter (kg)	Spez. Ab- schirmgewicht (Mp/kg)
	1) Länge (cm)	Mantel	Deckel			Behälter pro Fahrzeug	Glaszyl. pro Fahrzeug		
Ebh	60	34,5	34,5	90 x 139	6,5	3	3	8,8	0,74
	100	35,5	35	92 x 180	9	2	2	14,5	0,69
L 2	60	36	35	93 x 210	11,3	2	4	17,6	0,64
	100	37	35	95 x 290	16,7	1	2	29	0,58
L 3	60	38	35	97 x 280	15,1	1	3	26,4	0,57
	100	38,5	35	98 x 400	21,5	1	3	43,5	0,49
Q 3	60	38	37	118 x 144	11,1	2	6	26,4	0,42
	100	39	38	120 x 186	15	1	3	43,5	0,35
Q 7	60	40	40	150 x 150	18,6	1	7	61,6	0,30
	100	40	40	150 x 190	22,9	1	7	101,5	0,23
M 3	60	38	37	130 x 97 x 144	13,7	1	3	26,4	0,52
	100	39	37	132 x 98 x 184	17,5	1	3	43,5	0,40
M 7	60	38	37	215 x 97 x 144	22,1	1	7	61,6	0,36
	100	39	37	217 x 98 x 184	28,7	-	-	101,5	0,28

-54-

1) Die Ziffer in der Typenbezeichnung gibt die Anzahl der Glaszylinder pro Behälter an.

4.3.4 Preise, Abschreibung

Exakte Angaben über die zu erwartenden Behälterpreise können hier verständlicherweise noch nicht gemacht werden.

Der Preis für 1 kg Behältergewicht lag bei einem ähnlichen Transportbehälter im Frühjahr 1970 bei 5,50 DM. Davon ausgehend und in Anbetracht dessen, daß bei den hier vorliegenden Behältertypen im Verhältnis zum Gewicht sehr wenige mechanische Teile erforderlich sein werden, wurde für die Abschätzung ein Preis von 6,00 DM/kg Behältergewicht angenommen.

Die Abschreibung wird mit jährlich 20% des Behälterpreises angesetzt.

In Tabelle 4.3-2 sind Preise und Abschreibung der hier als Alternative anstehenden Behältertypen angegeben.

Tabelle 4.3 - 2

Typ	Glaszylinder Länge (cm)	Preis (TDM)	Abschreibung (TDM/a)
Ebh	60	39	7,8
	100	54	10,8
L 2	60	68	13,6
	100	101	20,2
L 3	60	91	18,2
	100	130	26,0
Q 3	60	67	13,4
	100	90	18,0
Q 7	60	112	22,4
	100	138	27,6

4.4 Transportarten

4.4.1 Mögliche Fahrten pro Jahr

4.4.1.1 Bahntransport

Die Fahrt eines DB-Wagens von Karlsruhe nach Remlingen dauert als Eilgut von 16.00 Uhr des ersten Tages bis 07.00 Uhr des dritten Tages, d.h. der Wagen ist 39 Stunden unterwegs. Ein Behälterumlauf dauert damit ca. eine Woche. Es wären 50 Fahrten pro Jahr möglich (5).

4.4.1.2 Straßentransport

Es ist folgender Zeitplan für den Behälter-Einsatz möglich:

Montag	08.00 bis 12.00 Uhr	Beladen in der GfK
	12.00 bis 22.00 Uhr	Fahrt GfK - ASSE
Dienstag	08.00 bis 12.00 Uhr	Entladen in der ASSE
	12.00 bis 22.00 Uhr	Fahrt ASSE - GfK
Mittwoch	08.00 bis 17.00 Uhr	Wartung des Behälters
		Beladen in der GfK
Donnerstag	08.00 bis 18.00 Uhr	Fahrt GfK - ASSE
Freitag	08.00 bis 12.00 Uhr	Entladen in der ASSE
	12.00 bis 22.00 Uhr	Fahrt ASSE - GfK

Mit einem derartigen Zeitplan wären 100 Fahrten im Jahr möglich.

4.4.1.3 Einschränkungen

Es muß damit gerechnet werden, daß in den Wintermonaten im Raum Wolfenbüttel aus straßenbautechnischen Gründen Straßentransporte mit einem Gewicht von mehr als 7 Mp nicht möglich sind (6).

Unter diesen Umständen verringert sich die Zahl der jährlichen Straßentransporte auf ungefähr 80 und, solange das Bergwerk ASSE keinen Gleisanschluß besitzt, die Zahl der Bahntransporte auf ungefähr 40.

4.4.2 Benötigte Behälter

Beim Einsatz von Sammelbehältern werden zusätzlich Entladebehälter benötigt, die den Erfordernissen der Schachtanlage der ASSE entsprechen. Diese Entladebehälter müßten ungefähr die gleichen Abmessungen wie die hier bereits beschriebenen Einzelbehälter (Ebh) besitzen. Es wird zweckmäßig sein, die Entladebehälter so zu konstruieren, daß sie auch als Einzelbehälter benutzt werden können (und umgekehrt).

Um ein zügiges Entladen von Sammelbehältern auf der ASSE zu ermöglichen, sollten dort mindestens zwei Entladebehälter stationiert sein.

In Tabelle 4.4.-1 ist die Anzahl der Transportbehälter angegeben, die benötigt werden, um die in der WAK anfallenden Spaltprodukte transportieren zu können.

Geht man davon aus, daß auf einem DB-Wagen sechs Ebh befördert werden können (Nutzlast ca. 40 Mp), dann wäre es möglich, bis zu einem WAK-Durchsatz von 80 ja to alle hochaktiven Abfälle mit einem Straßentransportfahrzeug bzw. einem DB-Wagen im Pendelverkehr von Karlsruhe nach Remlingen zu transportieren.

Tabelle 4.4 - 1

Durchsatz der WAK (jato)		40						60						80					
Typ	Länge	Notwend. Transporte pro Jahr	Benötigte Transportbeh.		Auslastung (%)		Notwend. Transporte pro Jahr	Benötigte Transportbeh.		Auslastung (%)		Notwend. Transporte pro Jahr	Benötigte Transportbeh.		Auslastung (%)				
			Bahn	Straße	Bahn	Straße		Bahn	Straße	Bahn	Straße		Bahn	Straße	Bahn	Straße			
Ebh	60	115	3	2	96	72	170	4	2	106	106	230	6	3	96	96			
	100	70	2	1	88	88	105	3	2	88	66	140	4	2	88	88			
L 2	60	60	2	1	75	75	85	2	1	106	106	115	3	2	96	72			
	100	35	1	1	88	44	53	2	1	66	66	70	2	1	88	88			
L 3	60	39	1	1	98	49	57	2	1	71	71	77	2	1	96	96			
	100	24	1	1	60	30	35	1	1	88	44	47	2	1	59	59			
Q 3	60	39	1	1	98	49	57	2	1	71	71	77	2	1	96	96			
	100	24	1	1	60	30	35	1	1	88	44	47	2	1	59	59			
Q 7	60	17	1	1	42	21	25	1	1	62	31	33	1	1	82	41			
	100	10	1	1	25	12,5	15	1	1	38	19	20	1	1	50	25			

4.5 Frachtkosten

Nach dem derzeitigen Stand dürfte der Preis für 1 Mp km bei derartigen Transporten im Straßenverkehr bei 0,12 DM und im Schienenverkehr bei 0,095 DM liegen. Legt man von der GfK zum Bergwerk ASSE eine Entfernung von 500 km zugrunde, dann betragen die Frachtkosten je Mp Behältergewicht 120 DM im Straßenverkehr bzw. 95 DM im Schienenverkehr.

Die mit diesen Voraussetzungen ermittelten Frachtkosten für die verschiedenen Behältertypen sind in Abhängigkeit vom WAK-Durchsatz in Tabelle 4.5 - 1 angegeben.

Es ist zu erkennen, daß die Frachtkosten bei steigender Spaltproduktmenge je Transportbehälter sinken.

Tabelle 4.5 - 1

Frachtkosten (TDM/Jahr) für Bahn- bzw. Straßentransport

Durchsatz der WAK (ja to)		40		60		80	
		Bahn	Straße	Bahn	Straße	Bahn	Straße
Ebh	60	71,5	90	105	132	142,5	180
	100	60	76	90,5	114	120	151
L 2	60	65,5	83	93	117,5	128	162
	100	56,5	71,5	86	108	113	143
L 3	60	57,5	72,5	84	106	114	144
	100	50,5	63,5	73	92,5	99	125
Q 3	60	42	53	61	77,5	83	105
	100	35	44	50	64	68	86
Q 7	60	30	38	44	56	62	78
	100	22	27,5	33	41	43,5	55

4.6 Transportkosten

Unter Transportkosten sei hier verstanden die Summe aus Frachtkosten und Abschreibung. Da in diesem Bericht lediglich ein Überblick über die zu erwartenden Kosten und ein Vergleich der möglichen Behältertypen gegeben werden soll, werden Betriebskosten, Versicherungskosten, Wartungskosten usw. nicht berücksichtigt.

Bei den Sammelbehältern ist die Abschreibung für zwei Entladebehälter hinzugezogen worden.

Bezieht man die anfallenden Transportkosten auf die erzeugte elektrische Arbeit, so entfallen bei 1 to Spaltprodukte pro Jahr 0,8 bis 1,2 Tausendstel DPf und bei 2 to Spaltprodukten je Jahr 0,6 bis 1,1 Tausendstel DPf auf eine kWh.

Tabelle 4.6 - 1

Transportkosten (TDM/Jahr) für Bahn- bzw. Straßentransport

Durchsatz der WAK (ja to)		40		60		80	
Typ	Länge	Bahn	Straße	Bahn	Straße	Bahn	Straße
Ebh	60	94,9	105,6	136,2	147,6	189,3	203,4
	100	81,6	86,8	122,9	135,6	163,2	172,6
L 2	60	108,7	112,4	136,2	146,9	185,0	205,2
	100	98,5	113,5	148,4	150,5	175,4	185,4
L 3	60	91,7	106,7	136,8	140,2	166,8	178,2
	100	98,5	111,5	121,0	140,5	173,4	173,0
Q 3	60	71,2	82,2	103,7	106,7	125,7	134,2
	100	74,8	83,8	89,8	103,8	126,1	125,8
Q 7	60	67,9	75,9	81,9	93,9	99,9	115,9
	100	71,1	76,6	82,1	90,1	92,6	104,1

4.7 Diskussion, Vergleiche

4.7.1 Glaszylinderlängen

Bei Verwendung von Ebh ist der Transport der Spaltprodukte billiger, wenn längere Glaszylinder hergestellt werden. Dem steht jedoch entgegen, daß bei der Herstellung und beim Verladen der Glaszylinder die Schwierigkeiten mit der Länge ansteigen.

Bei den Sbh wird erst mit steigendem WAK-Durchsatz eine Tendenz zur Verbilligung des Transports bei längeren Glaszylindern deutlich.

Damit kann gesagt werden, daß erst bei größeren Wiederaufarbeitungsanlagen eine größere Glaszylinderlänge anzustreben ist. Bei der WAK hat sie in den hier vorgegebenen Grenzen keinen großen Einfluß auf die Transportkosten.

4.7.2 Bahntransport - Straßentransport

Es ist festzustellen, daß die Transportkosten beim Bahntransport niedriger sind als beim Straßentransport. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß bis zur Fertigstellung von Gleisanschlüssen an der GfK und an der ASSE die Behälter auf dem jeweils nächsten Güterbahnhof verladen werden müssen. Wegen der langen Transportdauer ist wahrscheinlich bei Bahntransporten Begleitpersonal erforderlich, insbesondere, wenn zur Ableitung der Wärme von der Behälteroberfläche ein Gebläse benötigt wird. Die Kosten für Begleitpersonal sind in der Rechnung nicht berücksichtigt. Sie dürften für zwei Mann bei etwa 70 TDM je Jahr liegen.

Dagegen könnte man beim Straßentransport viel eher auf ein Gebläse verzichten, da hier Wartezeiten verhältnismäßig kurz sind und der Behälter ohnehin erst nach mehreren Stunden aufgeheizt ist.

Aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten dürfte es daher günstiger sein, die in der WAK anfallenden Spaltprodukte auf der Straße zu transportieren. Dem stehen jedoch andere Gesichtspunkte gegenüber, wie z.B. Entlastung des Straßenverkehrs.

4.7.3 Vergleich der Behältertypen

Aus Tabelle 4.6.-1 ist zu ersehen, daß der Transport mit den Behältern Q 3 bzw. Q 7 am billigsten ist, besonders bei steigendem WAK-Durchsatz. Der Einsatz der Sammelbehälter L 2 bzw. L 3 würde dagegen teilweise sogar teurer sein als der Einsatz von Ebh.

Da die Sbh übertage entladen werden, kommen sie nicht mit der im Bergwerk herrschenden Salzatmosphäre in Berührung. Ihre Korrosion wird daher geringer sein als die der Ebh.

Diesen Vorteilen der Sbh stehen die folgenden Nachteile gegenüber:

Der Aufwand, der beim Bau der Sbh zu treiben wäre, ist groß im Vergleich zum Aufwand, den die Ebh erfordern.

Die Handhabung der Glaszylinder auf der ASSE ist bei Verwendung von Sbh kompliziert und langwierig.

Wenn die Umladung nicht hinter einer zusätzlichen Abschirmung durchgeführt wird, ist die Bedienungsmannschaft einer Strahlung ausgesetzt, die bei 250 Glaszylindern je Jahr und 6 Minuten Manipulationsdauer je Glaszylinder die maximal zulässige jährliche Strahlendosis ergeben könnte.

In den Sbh ist das Verhältnis von abzuführender Wärme zu Oberfläche wesentlich höher als in einem Ebh. Zur Ableitung der entwickelten Wärmemenge von der Behälteroberfläche müßte daher ein erheblicher Aufwand getrieben werden.

Noch schwieriger wäre der Wärmetransport im Behälter. Hier müßte, insbesondere beim Typ Q 7, wahrscheinlich ein zusätzliches Kühlsystem vorgesehen werden, um die entstehende Wärme an die Abschirmung bzw. an die Oberfläche abzuführen.

Abschließend muß festgestellt werden, daß den wirtschaftlichen Vorteilen von Sammelbehältern wesentliche technische und praktische Nachteile gegenüberstehen.

Literaturangaben zu Teil 4

- (1) Krämer, H. und Seetzen, I.,
"Mögliche Entwicklungen einer künftigen Kernenergiewirtschaft
in der Bundesrepublik Deutschland"
Jül-600-RG, KFK-933, 1969
- (2) Deutsches Atomforum e.V.,
"Die kerntechnische Industrie in der Bundesrepublik Deutschland"
Neue Technik B 5/1969, S. 179
- (3) Holtzem, H. und Schwibach, J.,
"Können die radioaktiven Abfälle vieler Kernkraftwerke noch be-
wältigt werden?"
Atomwirtschaft, Dezember 1968, S. 582
- (4) Ramdohr, H.,
"Das Entwicklungsprogramm Brennstoffaufarbeitung"
KFK-Nachrichten 1/70, S. 1
- (5) Mitteilungen der Deutschen Bundesbahn vom 10.6.1970
- (6) Mitteilung Straßenbauamt Wolfenbüttel vom 13.4.1970

Abb. 13. 1bis6

Erforderliche Abschirmdicken in
 Abhängigkeit von der Kühlzeit
 Dosisleistung $10 \frac{\text{mrem}}{\text{h}}$ in 3m Entfernung
 von der Mittellinie des Transportbehälters.

T = THTR - Spaltprodukte

L = LWR - Spaltprodukte

N = NaBr - Spaltprodukte

Glaszylinderdurchmesser d:

— 20 cm

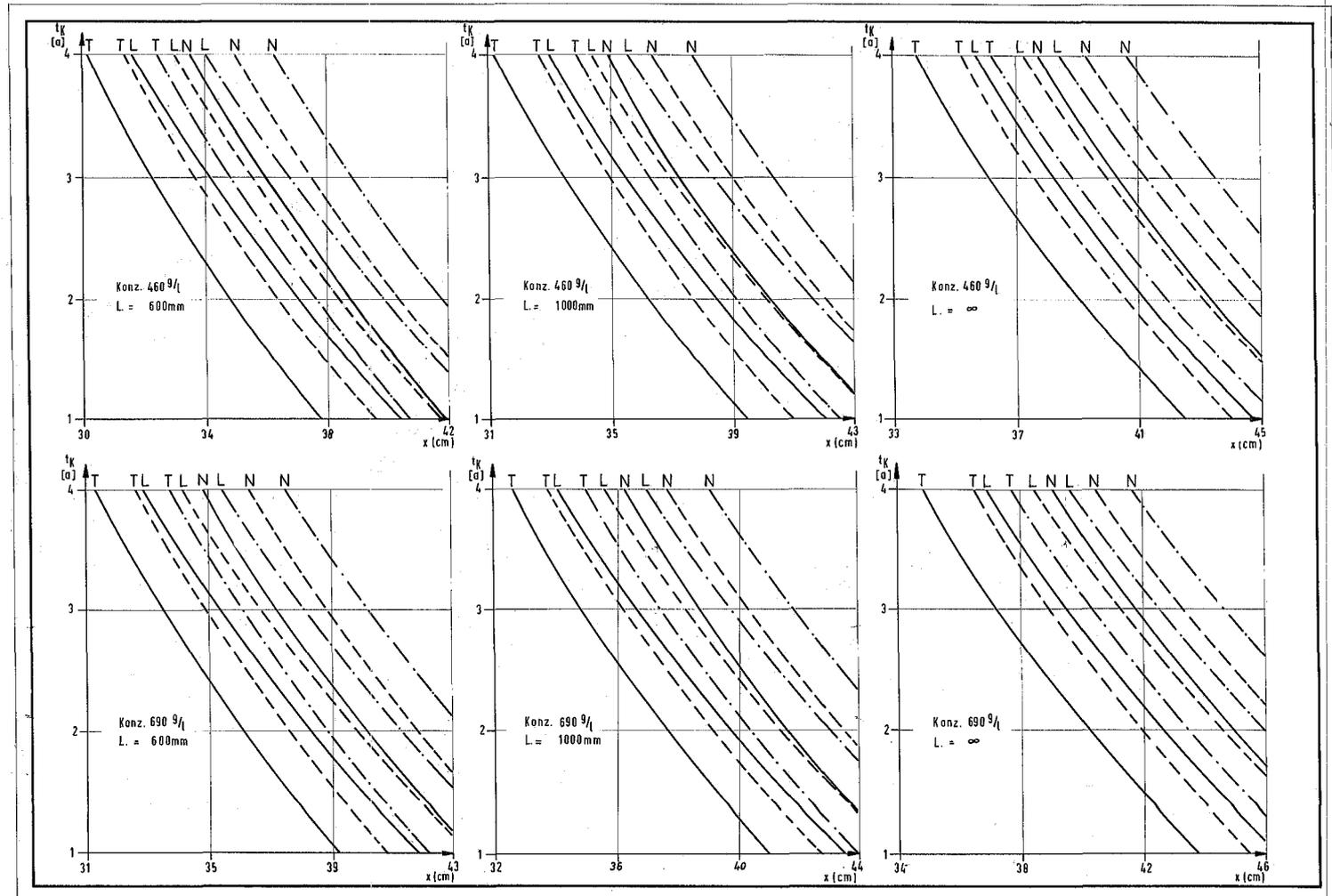
- - - 25 cm

- · - 30 cm

x = Abschirmdicke

t_k = Kühlzeit

L = Glaszylinderlänge



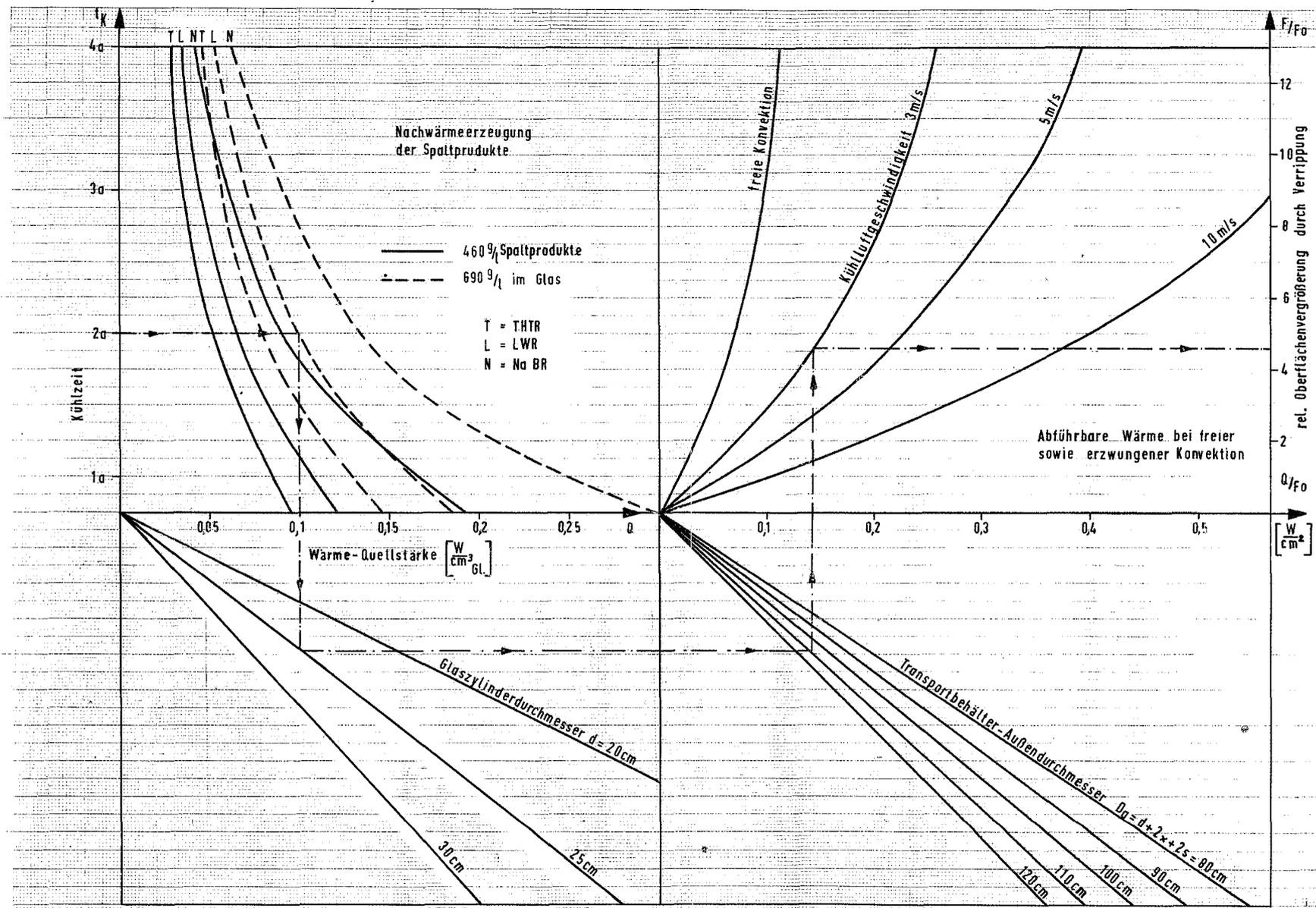


Abb 2 3-1 Wärmeübergang an der Transportbehälter-Oberfläche

Abb. 24-1

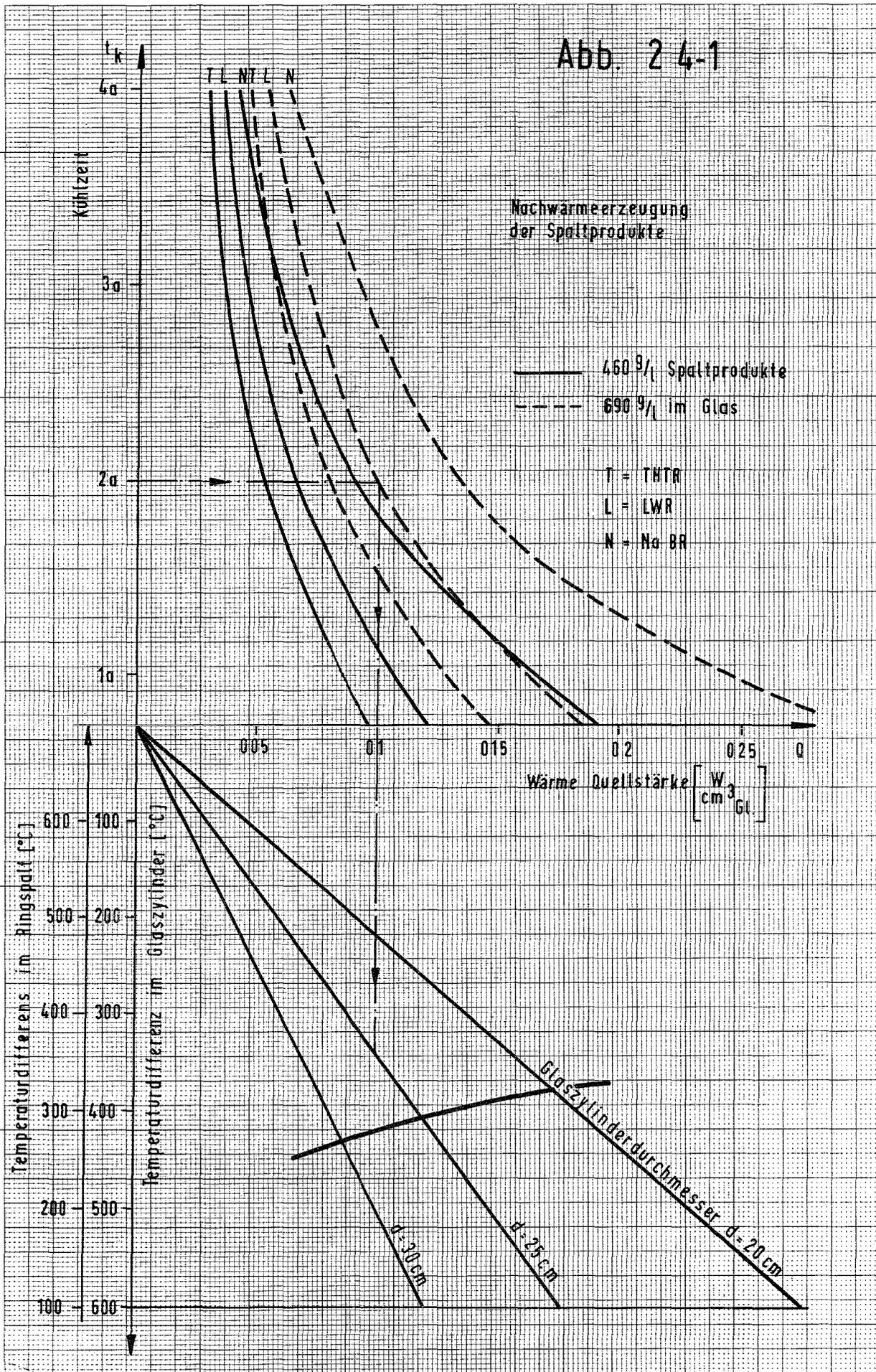


Abb. 2.4.-2 Wärmetransport durch einen 1cm dicken Ringspalt

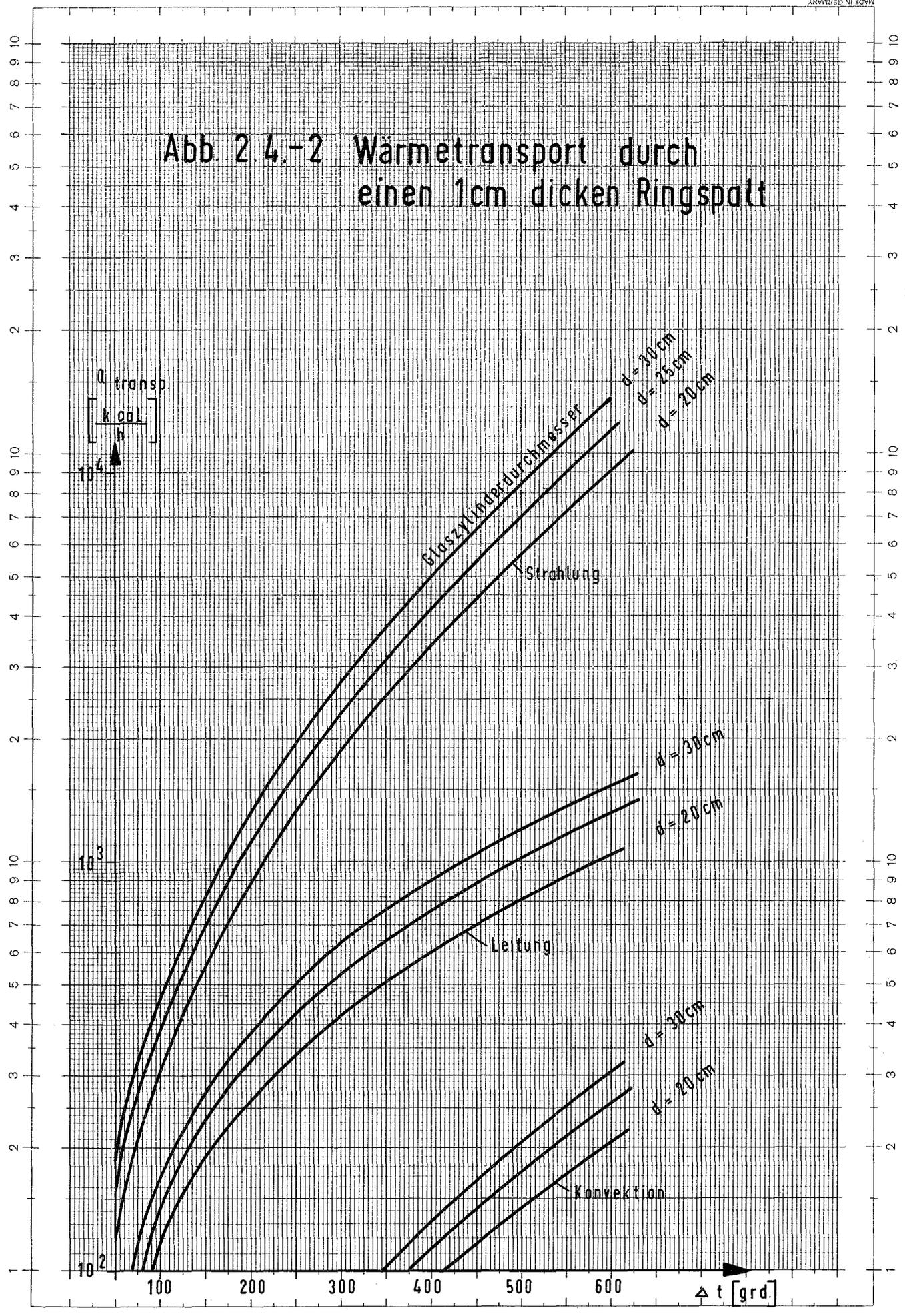


Abb 3.3.-1
 Temperaturverlauf in der
 Abschirmung beim Schadensfeuer

