

Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe – Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen

Dr.-Ing. B. Schulz-Forberg, Dipl.-Ing. W. Kraus

1. Einleitung

Von einem bestimmten Gefahrenpotential ab, hier ausgedrückt durch eine zu befördernde Aktivitätsmenge, werden besonders hohe Anforderungen an Transportbehälter für radioaktive Stoffe gestellt. Über die üblicherweise den Betrieb und allenfalls den leichten Zwischenfall abdeckenden Anforderungen hinaus werden hier solche erhoben, die praktisch zu unfallsicheren Behältern führen.

Während die verkehrsrechtlichen Zulassungsanforderungen an Transportbehälter mehr oder weniger durch die internationale Atomenergie-Agentur (IAEA)-Empfehlungen /1/ definiert sind und auf denen die nationalen und internationalen Rechtsvorschriften für den Verkehr aufbauen, müssen die Sicherheitskriterien für die Lageranforderungen erst einmal festgelegt werden, da im Atom-Gesetz die Sicherheitsziele nur in sehr allgemeiner Form formuliert sind und keine spezifischen Anforderungen an das „trockene Behälter-Zwischenlagerkonzept“ existieren. Nichtdestoweniger hat die Reaktor-Sicherheitskommission – ein beratendes Gremium von Sicherheitsexperten des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) – in einer Stellungnahme zur Eignung von Transportbehältern für die Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente (BE) festgestellt /2/, daß die Typ B(U)-Zulassung für die Behälterbauart vorausgesetzt werden soll und zusätzlich kompatible lagerspezifische Anforderungen aufgestellt werden sollen. Die Vorteile dieser Lösung liegen in der einfachen Eingliederung in den Kernbrennstoffkreislauf und einer Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens auf der Grundlage des von der IAEA weltweit vorgegebenen Sicherheitsniveaus. Die Kriterien für die Auslegung der Transportbehälter im Hinblick auf die Abschirmung, Kritikalitätssicherheit und Wärmeabfuhr sind für Transport und Zwischenlagerung ähnlich oder identisch.

Im Unterschied zu konventionellen Transportbehältern haben Behälter zur Zwischenlagerung zusätzliche Anforderungen im Hinblick auf die Langzeiteignung zu erbringen /3/:

– Ein Zwei-Barrieren-System als redundanter Verschluss des Behälters

- Langzeit - Dichtheitseignung der dichten Umschließung (DU)
- Anforderungen an die Trockenheit des Behälterinnenraumes und aller anderen Zwischenräume des Deckelsystems zur Vermeidung von Korrosion
- permanente Dichtheitsüberwachung der DU
- Wartungskonzept für das Deckelsystem zur Wiederherstellung des Zwei-Barrieren-Konzepts für den Fall des Versagens einer Barriere.

Im Hinblick auf die Unfallanalysen konnte gezeigt werden, daß die Störfallannahmen für das Zwischenlager normalerweise von den Qualifikationsnachweisen als Transportbehälter abgedeckt werden.

2. Das IAEA-Konzept zum Nachweis der Unfallsicherheit

Die IAEA-Empfehlungen /1/ beschreiben in §701 vier Verfahren zum Nachweis der spezifizierten Unfallbedingungen. Diese Verfahren können einzeln oder in Kombination angewandt werden.

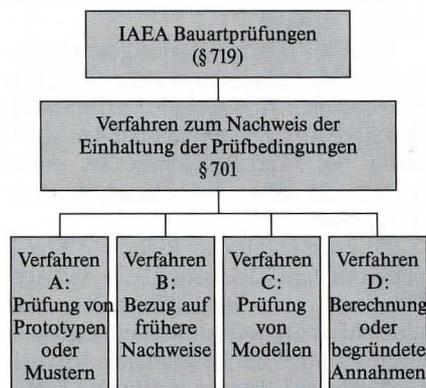


Bild 1: Überblick über die möglichen gleichwertigen Prüf- und Bewertungsverfahren

(A) Durchführung von Prüfungen an Serienmustern oder Prototypen der Verpackung, wie sie üblicherweise zur Beförderung aufgegeben werden; in diesem Fall muß der Inhalt der Verpackung möglichst genau dem zu erwartenden radioaktiven Inhalt entsprechen;

- (B) Bezugnahme auf frühere zufriedenstellende und genügend vergleichbare Nachweise;
- (C) Durchführung von Prüfungen an Modellen eines geeigneten Maßstabes;
- (D) Berechnung oder begründete Darstellung, wenn die Berechnungsverfahren und Parameter nach allgemeiner Übereinstimmung zuverlässig sind.

2.1 Prüfungen mit Prototypen oder Mustern

Das Verfahren (A) (§ 701) befaßt sich mit der Durchführung von Tests mit Prototypen. Die Anwendung dieser Methode in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) für Behälter aus Sphäroguß (GGG-40) ist detailliert beschrieben in /4/. Die wichtigsten Schritte, die Fähigkeit der Prüfmuster nachzuweisen, den definierten Unfallbedingungen zu widerstehen, sind:

- (I) Ein 9 m-Fallversuch bei -40°C eines Prüfmusters im Originalmaßstab auf ein unnachgiebiges Fundament. Dabei muß der Fallversuch so ausgeführt werden, daß das Prüfmuster den größten Schaden erleidet. Das positive Ergebnis des 9 m-Falls liefert eine Sicherheitsaussage gegenüber den spezifizierten Unfallbelastungen und zu der Zuordnung von Beanspruchungszustand und Werkstoffeigenschaften. Aus diesem Ergebnis kann u. a. der Schluß gezogen werden, daß die Sicherheit gegen sprödes Versagen für das geprüfte Muster > 1 ist. Die Übertragbarkeit dieser Zuordnung und der Sicherheitsaussage auf weitere Serienmuster der gleichen Bauart oder auf verwandte Bauarten bedarf weiterer Elemente:
- (II) Analyse der max. Spannungsverhältnisse, ermittelt am Prüfmuster durch instrumentierte Versuche mit Dehnmeßstreifen und Beschleunigungsaufnehmern.
- (III) Analyse der tatsächlichen, für das Versagen bedeutsamen Werkstoffeigenschaften in den beanspruchten Bereichen des Prüfmusters.

Bei Begrenzung der Primärspannungen auf ca. 50% der Streckgrenze, was durch entsprechende Auslegung der Stoßdämpfer erreicht werden kann, werden hierzu die Kennwerte aus dem Zugversuch, insbesondere der A_5 -Wert (Bruchdehnung), als der kennzeichnende Wert herangezogen. Hierzu s. /4/ mit der besonderen Anpassung an den Werkstoff GGG-40.

(IV) Ermittlung aller (gießtechnischer) Herstellungsparameter, die die Qualität des Prüfmusters beeinflussen haben.

Einen Ablauf vermittelt das nachstehende Bild 2.

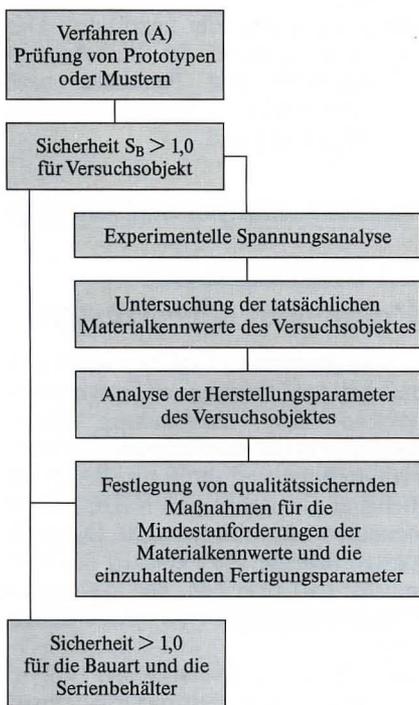


Bild 2: Grundsätzlicher Ablauf des Verfahrens A: Prüfung von Prototypen mit der Feststellung, daß die Sicherheit gewährt, aber nicht quantifiziert wird.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wird es möglich sein, ein Qualitätssicherungs-Programm zu erstellen, das geeignet ist, die Qualität des Prüfmusters zu reproduzieren. Dieses Programm, geprüft und überwacht durch die zuständige Behörde, legt bauartspezifische Qualitätsmerkmale und Herstellungsparameter fest.

Mit diesen Elementen wird das positive Ergebnis der Prototypprüfungen gültig, auch für alle Serienmuster, die innerhalb der genehmigten Grenzwerte gefertigt werden.

2.2 Bezug auf frühere Nachweise

Dieses Verfahren (§ 701 B) kann in den Fällen angewandt werden, in denen

die Bauart zu einer Familie vergleichbarer Bauarten zählt, die bereits früher geprüft und zugelassen worden sind. Die Unterschiede zwischen den Bauarten einer solchen Familie werden durch unterschiedliche Abmessungen von Bauteilen in Abhängigkeit von Art und Anzahl der Brennelemente (BE) gekennzeichnet. Das Verpackungskonzept, charakterisiert durch die Auslegung des Deckel-Dicht-Systems, der Anschlagpunkte, der Stoßdämpfer und der verwandten Werkstoffe, ist bei allen Bauarten gleich.

Unter diesen Bedingungen können wesentliche Ergebnisse einer Prototypprüfung auf neue Bauarten im Analogieschluß übertragen werden. Dies setzt allerdings gleiche Werkstoffeigenschaften voraus, andernfalls müssen zusätzliche Überlegungen angestellt werden. In der Praxis wird Verfahren (B) immer durch (D) „Berechnung oder begründete Annahmen“ vervollständigt.

2.3 Untersuchungen mit Modellen

Durchführung von Prüfungen an Modellen eines geeigneten Maßstabes müssen alle für den zu prüfenden Gegenstand wesentlichen Merkmale enthalten, da aus der technischen Erfahrung bekannt ist, daß die Ergebnisse derartiger Prüfungen für Herstellungszwecke geeignet sind. Bei Verwendung eines Modells dieser Art ist die Notwendigkeit zu berücksichtigen, daß bestimmte Prüfparameter, wie z. B. der Durchmesser der Prüfspitze oder die Drucklast, angepaßt werden müssen.

Gemäß /1/ und aufgrund der Gültigkeit der Modellgesetze werden Versuche an Modellen mit geeignetem Maßstab durchgeführt. Die modellmäßige Abbildung der Werkstoffmatrix ist dabei jedoch als eines der Hauptprobleme anzusehen.

Deshalb wurde eine Reihe von Versuchen mit dem Ziel, sowohl die Aussagefähigkeit von Modellversuchen als gleichberechtigte Testmethode zu bestätigen als auch zu verwendende Modellmaßstäbe größenordnungsmäßig derart zu bestimmen, daß sie repräsentative Aussagen für den Prototyp zulassen /6/, durchgeführt.

Die Anwendbarkeit der Modellgesetze /7, 8/ auf Fallbeanspruchungen läßt sich aus ihrer Allgemeingültigkeit herleiten und wurde u. a. durch experimentell ermittelte Werte (s. a. Bild 6) /6/ bestätigt. Der gleiche Zusammenhang läßt sich auch anhand einer Energiebetrachtung im elastischen Bereich herleiten.

2.4 Berechnung oder begründete Darstellung

Dieses Verfahren kann angewendet werden, wenn die zugrunde gelegten Berechnungsverfahren und Parameter nach allgemeiner Übereinstimmung zuverlässig bzw. hinreichend konservativ sind.

Bild 3 zeigt die wichtigsten Schritte dieses Verfahrens:

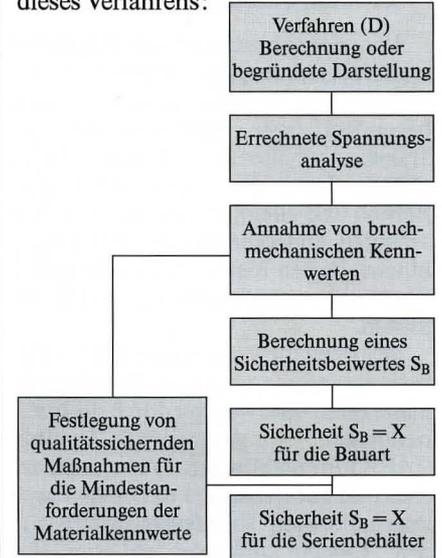


Bild 3: Grundsätzlicher Ablauf des Verfahrens D: Prüfung durch Berechnung mit der Feststellung einer quantifizierbaren Sicherheit.

Mit den Annahmen für die mechanische Belastung im Verhältnis zur Spannungsintensität (welche durch die Faktoren der Streckgrenze und der Zugfestigkeit begrenzt werden) und für ein bestimmtes Material standardisierte bruchmechanische Kennwerte kann ein Sicherheitsfaktor für das „spröde Versagen“ angegeben werden. Diese für das Baumuster gültige Aussage wird durch geeignete qualitätssichernde Maßnahmen, welche sicherstellen, daß die vorausgesetzten Materialkennwerte in der Praxis eingehalten werden, für die Serienbehälter übertragbar.

2.5 Angewendete Verfahren in der Bundesrepublik Deutschland

Bei allen Typ B-Begutachtungen, bei denen die Verfahren (A), (B) oder (C) angewendet werden, hat die BAM den Sicherheitsnachweis in Kombination mit den vom Antragsteller vorgelegten analytischen Nachweisen im Sicherheitsbericht geführt. Hierzu muß angemerkt werden, daß die BAM die Bewertung der mechanisch/thermischen Belastungen vornimmt und die

qualitätssichernden Maßnahmen festlegt; die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig bewertet die Strahlenschutzaspekte und genehmigt als zuständige Behörde im Verkehrsrecht die Bauart. Näheres s. /23/.

3. Darstellung der verschiedenen Verfahren an Beispielen

3.1 Bauartprüfung eines Transport- und Lagerbehälters vom Typ CASTOR Ia Prototyp

Der Nachweis der mechanischen Integrität des Behälters, seiner Komponenten und des Deckel-Dicht-Systems wurde entsprechend /1/, in Übereinstimmung mit § 719 IAEA, durch Fallversuche durchgeführt.

Der Behälterkörper, typisch für die erste Generation der CASTOR-Bauart, ist mit axial-angegossenen Rippen versehen und in einem Stück aus dem Werkstoff Sphäroguß (GGG 40) gegossen, siehe Bild 4.

Die Versuche wurden auf dem Versuchsgelände der BAM in Lehre, in der Nähe von Braunschweig, durchgeführt; das Fundament hat eine quadratische Grundfläche von 10 x 10 m, eine Dicke von 4 m und besteht aus armiertem Stahlbeton. Es ist durch eine 200 mm dicke, ca. 20 t schwere Stahlplatte (6 m x 2 m x 0,2 m) abgedeckt. Dieses Fundament ist direkt in den festen Untergrund eingebettet und hat eine Masse von ca. 1000 Tonnen.

Seismische Messungen der BAM während Fallversuchen /10/ zeigten, daß nur ca. 2 % der Fallenergie vom Fundament aufgenommen wurde, während zu 98 % ein Energieumsatz im Behälter selbst stattgefunden hat.

Bei den Versuchen waren Beschleunigungsaufnehmer und ggf. Dehnmeßstreifen an verschiedenen Stellen des Behälters angebracht und wurden Dichtmessungen mittels Helium-Leck-Test oder anderer Verfahren durchgeführt.

Die Wertungen der Versuchsergebnisse wurden durch Maßprüfungen und Kontrolle der Schraubenanzugsmomente, high-speed-Filmaufnahmen und Photos ergänzt. Für die Vorbereitung, Durchführung und Dokumentation der Versuche wurden Prüfpläne, Datenblätter und Checklisten verwendet. Die endgültigen Resultate sind in einem Versuchsbericht zusammengefaßt.

Es war das erste Mal, daß ein Prototyp (Gesamtgewicht 70,6 t, inklusive simuliertem Inhalt und Stoßdämpfern) dieser Größe den folgenden Versuchen unterzogen wurde:

1. Falltest: Fall auf den Behälterboden mit Stoßdämpfer bei Umgebungstemperatur;
2. Falltest: Fall auf Deckelkante mit Stoßdämpfer bei Umgebungstemperatur (Behälterschwerpunkt über der Aufschlagstelle);
3. Falltest: Waagerechter Fall auf die Tragzapfen (aus Sphäroguß-Vollmaterial) bei einer Versuchstemperatur von -40°C .

Der Inhalt bei diesen Versuchen wurde durch einen Baustahlkorb für vier Positionen und vier Brennelement-Dummys, Typ Biblis, simuliert.

4. Falltest: Waagerechter Fall auf die Tragzapfen (aus Edelstahl in Hohlbauweise) bei Umgebungstemperatur.

Die Integrität und die spezifizierte Dichtheit wurden nach allen Versuchen überprüft.

Inzwischen wurde in der BAM eine Vielzahl von Versuchen an 13 weiteren Prototypen aus Sphäroguß (GGG 40) mit positivem Ergebnis durchgeführt. Es handelte sich hierbei um Transport- und Lagerbehälter für Druckwasser-, Siedewasser-, Forschungsreaktor- und Hochtemperaturreaktorbrennelemente sowie solche für mittelaktiven Abfall; das Behältergewicht reichte von 6 t bis mehr als 100 t.

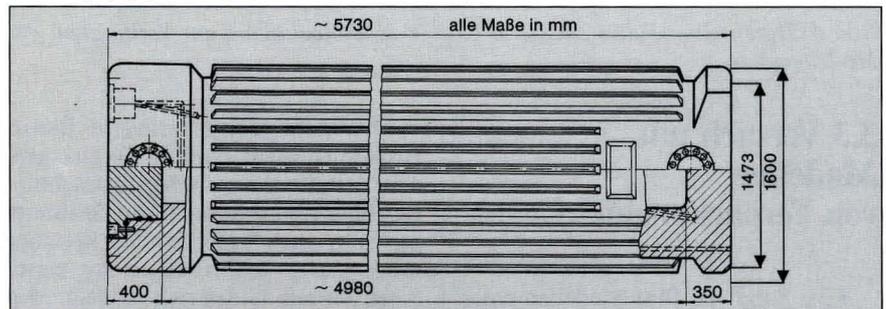


Bild 4: Brennelementbehälter vom Typ CASTOR Ia Prototyp für den Transport von 4 bestrahlten Druckwasserbrennelementen, Gesamtgewicht ca. 70 t.

3.2 Beurteilung auf der Basis früherer Nachweise

Die Bauart CASTOR KRB-MOX ist ein Beispiel für dieses Vorgehen, bei der der Sicherheitsnachweis auf Ergebnissen früher durchgeführter Versuche mit anderen Bauarten basiert.

In Übereinstimmung mit dem Verfahren (B) der IAEA, § 701 /1/ und den Aussagen im BAM-Werkstoffkonzept /4/ können positive Ergebnisse durchgeführter Prototyptests, bei gleichen garantierten Materialkennwerten und vergleichbaren Behälterabmaßen; auf andere Bauarten übertragen werden, wenn die Nominalspannungen in Hauptspannungsrichtung während des Aufpralls ca. 50 % der $R_{p0,2}$ -Dehngrenze nicht überschreiten. Im Hinblick auf die weitgehenden Ähnlichkeiten der Bauarten CASTOR Ia und CASTOR Ic mit der neuen Bauart CASTOR KRB-MOX konnte, unter Berücksichtigung der fest-

gestellten Materialkennwerte der hergestellten Behälter, nachgewiesen werden, daß die $0,5 R_{p0,2}$ -Grenze nicht überschritten wird.

Im einzelnen wurde für diesen Nachweis der Fall auf die Mantellinie betrachtet, bei dem die höchsten Spannungen in der Mitte des zylindrischen Teils des Behälters ähnlich einem Biegebalken auf zwei Auflagern erwartet wurden. Die vorgelegten quasistatischen Berechnungen wurden akzeptiert, bei denen Beschleunigungswerte aus kalibrierten Stoßdämpferberechnungsprogrammen beziehungsweise konservativen Werten beim Fall auf die Tragzapfen verwendet wurden. Weitere Übertragbarkeitsbetrachtungen wurden, basierend auf Ergebnissen aus Modellversuchen (Maßstab 1 : 2) der Bauart CASTOR IIa, durchgeführt.

Die folgende Übersicht zeigt die wichtigsten Daten der beiden Bauarten im Vergleich:

		CASTOR Ic	CASTOR KRB-MOX
Masse	ca.	83 000 kg	63 100 kg
Behälterlänge		5 505 mm	4 900 mm
Außenquerschnittsabmessungen (Behältermitte)		□ 1 720 mm	□ 1 360 mm
Innenquerschnittsabmessungen (Behältermitte)		□ 669 mm	□ 523 mm
Widerstandsmoment (Behältermitte)	ca.	0,59 m ³	0,45 m ³

Bild 5: Parameter zweier ähnlicher Behälter als Basis zum Vergleich der Aussagen für eine Eignung des KRB-MOX ohne erneute faktische Prüfung

Modell- maßstab	Dehnung			Ver- formung [mm]	Modell- maßstab (Ver- formung)	berech- nete Frequenz [kHz]	gemes- sene Frequenz [kHz]
	Deckel- mitte [%]	Schraube 1 [%]	Schraube 2 [%]				
1,00	-	-	-	-	-	1,70	1,67
1,26	0,054	-	0,080	0,153	1,24	2,11	2,00
1,72	0,060	-	-	0,124	1,68	2,89	3,53
2,03	0,065	0,110	-	0,104*)	-	3,33	4,00
2,60	0,052	0,110	0,085	0,073	2,60	4,26	6,67

*) Aus der mittleren Dehnung 0,058

Bild 6: Daten einer Fallversuchserie mit 7 V-Modellbehältern zur Verifikation der Modellgesetze

3.3 Versuch mit Modellen von Verpackungen

Eine Serie von fünf Modellen eines Behälters für den Transport von radioaktivem Abfall wurde 9 m-Fallversuchen unterzogen. Der Original-Transportbehälter (Masse 35 t) kann sieben Fässer mit je 200 l Inhalt aufnehmen, wobei der Abfall dabei entweder an Beton oder Bitumen gebunden ist. Die Verpackung „7 V“ kann als kurzer, steifer Zylinder beschrieben werden, mit geschweißtem Boden und geschraubtem Deckel. Alle Fallversuche wurden flach auf dem Boden ausgeführt.

Die Meßergebnisse sind in Bild 6 zusammengefaßt. Zunächst ist zu erkennen, daß die theoretischen Betrachtungen über die Abbildung von Spannungen nun auch experimentell bestätigt werden. Die Verformungen im elastischen Bereich bilden sich modellmäßig ab unter Voraussetzung einer tolerierbaren Schwankungsbreite der Meßwert-erfassung.

Der Vergleich der gemessenen Dekkel-frequenzen während der Aufprallphase mit dem Modellmaßstab bis zu einem Maßstab von 1 : 2 ist hinreichend gut. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Frequenzen bei größeren Maßstäben dagegen erfordern noch weitere und tieferegehende Untersuchungen.

3.4 Begutachtung auf der Grundlage der Berechnungen im Sicherheitsbericht Beispiel Bauart GNS 11

Die Begutachtung der Bauart GNS 11 basierte auf umfangreichen Berechnungen des Antragstellers im Sicherheitsbericht. Bei dieser Bauart handelte es sich um eine geschweißte Edelstahl/Blei-Sandwich-Bauweise, die verwendeten Materialien waren DIN-Standard-Werkstoffe mit garantierten Kennwerten auch für die tiefste Einsatztemperatur – 40 °C.

Neben der Überprüfung der maximalen Spannungen wurde auf die Schweißung besonderes Augenmerk gelegt. Detaillierte Schweißpläne mit zugehörigen Fertigungs-Prüffolge-Plänen wurden vorgelegt und im Auftrag der BAM vom zugezogenen Sachverständigen

(TÜV-Berlin e. V.) geprüft. Die Annahmen der Behälterbelastungen konnten für diese Berechnungen direkt aus Ergebnissen mit einem Prototypversuch eines Behälters mit derselben Masse, identischem Deckel-Dicht-System und gleichen Stoßdämpfern gewonnen werden.

Die maximalen Behältertemperaturen unter normalen Transportbedingungen (mit Sonneneinstrahlung und Quellwärme des radioaktiven Inhaltes) wurden ebenso wie die maximalen Unfalltemperaturen bei einem Schadensfeuer anhand einer zweidimensionalen Wärmerechnung ermittelt, welche bei früheren Versuchen im Vergleich mit realen Feuer-tests /14/ kalibriert wurden.

Für die Abschätzung durch die BAM waren die Ergebnisse der Wärmerechnung geeignet nachzuweisen, daß sowohl die zulässige Oberflächentemperatur von 82 °C als auch unzulässig hohe Temperaturen für bestimmte Bauteile (Elastomer-Dichtringe, Bleischmelztemperatur und Inhalt) nicht erreicht werden.

4. Zusammenstellung der von der BAM begutachteten deutschen Transport-Behälterbauarten

Die folgenden Tabellen fassen den Stand der Begutachtung für die Typ B-Zulassung sowohl der Behälter für abgebrannte Brennelemente als auch für radioaktive Abfälle zusammen. Der Stand der Begutachtung für jede Bauart kann an der Länge des Balkens abgelesen werden.

„Prüfungszeugnis in Bearbeitung“ soll bedeuten, daß der Sicherheitsnachweis in bezug auf das mechanisch/thermische Verhalten der Bauart von der BAM akzeptiert ist, beziehungsweise daß das Prüfungszeugnis bereits an die PTB gesandt wurde.

„LOI“ bedeutet einen „letter of intent“ der BAM, welcher die generelle Möglichkeit der Begutachtung einer neuen Bauart, in Übereinstimmung mit den gesetzlichen Vorschriften, bescheinigt.

Validierung bedeutet, daß ein anderer Staat die Ursprungszulassung bestätigt hat.

Nicht enthalten in dieser Übersicht sind verschiedene Bauarten von Verpackungen für nicht spaltbare Materialien (z. B. Gammagraphiegeräte), Verpackungen für frische Brennelemente und andere radioaktive Komponenten.

5. Tatsächliche Leistungsfähigkeit der verwendeten Begutachtungsverfahren

5.1 Ermittlung der Sicherheitsreserven durch gesteigerte mechanische Beanspruchung

Die Transportvorschriften schreiben unter anderem vor, daß Typ B-Behälter einem Fallversuch aus 9 m Höhe sowie einem Dorn-Test standhalten müssen. Darüber hinaus scheint gerade bei leichten Verpackungen das Widerstandsverhalten gegenüber Crush-(Quetsch)-Beanspruchung eine stärkere Belastung darzustellen.

Zur Ermittlung der Sicherheitsreserven hinsichtlich mechanischer Beanspruchungen wurden daher gesteigerte Fallversuche sowie Crush-Tests durchgeführt.

Die Versuche umfaßten:

- Crush-Tests (Fallgewicht bis zu 2 t aus 9 m)
- gesteigerte Fallversuche aus Höhen bis zu 200 m

5.1.1 Crush-Tests (Quetsch-Versuche)

Für leichte Verpackungen führt die Beanspruchung durch den 9 m-Fallversuch sicher nicht zu einer sehr schweren Schädigung. Auch eine Vergrößerung der Fallhöhe bis zum Erreichen der freien Sinkgeschwindigkeit wird von derartigen Verpackungen häufig ertragen.

Die leichte Konstruktion bietet aber gegenüber Quetschbeanspruchungen wesentlich geringeren Widerstand. Die Umkehrung des IAEA-Fallversuches, d. h. Fall einer Masse (Crush-Gewicht) auf den Behälter, bot sich daher an /15/. Die Festlegung der Crush-Parameter (Masse, Form) orientierte sich an den Gewichten repräsentativer Verpackungen sowie potentieller Crush-Massen.

Während solche Verpackungen sogar Fallversuche aus großen Höhen überstehen – wie später noch zu zeigen ist –, versagen die Verpackungen häufig unmittelbar nach dem durchgeführten dynamischen Quetschtest, ggf. auch erst bei der sich anschließenden Erhitzungsprüfung.

Als ein Ergebnis dieser Untersuchungen wurde ein Verbesserungsvorschlag für die IAEA Regulations, Section VII, Chapter „Test for demonstrating the ability to withstand accident conditions in transport“, vorgestellt /15/. Zwischenzeitlich wurde dieser Vorschlag von der IAEA angenommen und stellt als § 627 (c) einen wichtigen Teil der mechanischen Prüfungen für bestimmte Typ B-Verpackungen dar. Das IAEA-Konzept ist damit auch für „leichte“ Verpackungen schlüssig.

5.1.2 Fallversuche an leichten Behältern aus großen Höhen, exemplarisch an einem 18-B-Plutonium-Nitrat-Behälter dargestellt

Es wurde das Widerstandsverhalten der zu untersuchenden Behältertypen gegenüber Beanspruchungen durch Abwurf aus großen Höhen ermittelt. Dabei erfolgten die Abwürfe aus einer Höhe, bei der das Erreichen der stationären Sinkgeschwindigkeit sichergestellt wurde.

In Zusammenarbeit und mit freundlicher Unterstützung einer britischen Heeresflieger-Abteilung in Berlin (West) wurden die Fallversuche auf dem Flughafen Berlin-Gatow durchgeführt.

Diese und andere Untersuchungen /18/ zeigten, daß bis zum Erreichen der stationären Sinkgeschwindigkeit durch gesteigerte Fallhöhen keine anderen

Transportbehälterbauarten aus GGG-40 für abgebrannte Brennelemente (BE)
Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren
Tabelle 1
Nov. '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
CASTOR Ia	85	4 PWR-BE	1 1,5	35,000 45,000	—	—	—	1	Transp./Lag. Biblis
CASTOR KRB-MOX	63	16 MOX-BE	5	14,000	—	—	Schweden	4	Transp. CLAB, Schweden
CASTOR IIa	131	9 PWR-BE	1 1,5	35,000 45,000	—	—	—	7	Transporte Stade
CASTOR Ib	64	4 PWR-BE	0,8	37,000	—	—	—	9	Lagerung in Würzgassen
CASTOR Ic	85	16 BWR-BE	1	26,840	—	—	—	2	Transporte Biblis
CASTOR Ic/21	88	21 BWR-BE MOX-BE	1,75 2,5	45,000 45,000	—	—	—	7	Kalthandhabung
TN 1300/1-12	120	12 PWR-BE	2,5	42,000	—	—	—	1	Lagerung in TVO Finnland
TN 900/1-21	81	21 BWR-BE	1,3	35,000	—	—	—	1	Handhabung im WWER Woronesh, SU gepl. 12 Transporte
CASTOR TVO	102	41 BWR-BE	5	45,000	—	—	Finnland	13	Lagerung in TVA, USA Kalthandhabung in Sellafield, UK
CASTOR WWER 1000	110	21 PWR-BE	2	28,000	— LOI —	—	—	3	
CASTOR IIb	85	8 PWR-BE	0,74	40,000 42,000	—	—	—	1	
CASTOR V/21	115	21 PWR-BE	5	35,000	—	—	(Lagergenehmigung, USA)	1	
CASTOR S1	90	6 PWR-BE	1,25	45,000	—	—	—	1	
CASTOR S2	85	17 BWR-BE	1 1,25	35,000 45,000	—	—	—	1	

Transportbehälterbauarten aus GGG-40 für abgebrannte Forschungsreaktor BE
Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren
Tabelle 2
Nov. '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
CASTOR Ic Diorit	79	350 MTR-BE	—	—	—	—	—	1	Lagerung in EIR, CH
CASTOR MTR	11	15 MTR-BE DIDO 16 MTR-BE MERLIN	—	—	—	—	S, B, CDN NL, F	6	gepl. 12 Transporte
CASTOR MTR-F	13	„ „ Abfall	—	—	—	—	—	2	
CASTOR SPX-T	110	7 Brüter BE SPX	2	125 000	—	—	—	1	
CASTOR K12	105	12 „ „ 9 „ „	5 3	125 000 125 000	—	—	—	1	
CASTOR BN	120	36 Brüter BE BN	1	125 000	—	—	—	1	

Transportbehälterbauarten aus GGG-40 für abgebrannte Hochtemperatur-Reaktor BE
Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren
Tabelle 3
Nov. '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
CASTOR THTR-AVR	28	2100 HTGR BE 1900 AVR BE	—	—	—	—	—	20	Kalt-Handhabung
TN-THTR 1/IIId	30	2100 HTGR BE	—	—	—	—	—	3	Kalt-Handhabung
CASTOR AVR-T	15	1900 AVR BE	—	—	—	—	—	1	

Transportbehälterbauarten aus GGG-40 für LSA/SCO (radioakt. Abfall)
Tabelle 4 Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren Nov. '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
MOSAIK I	6	LSA/SCO			—			90	Lagerung in kern-technischen Anlagen
MOSAIK II KfK	7	"			—			400	"
MOSAIK III	3-5	"			—			325	"
MOSAIK II-15	8	"			—			1225	"
MOSAIK CLAB	8	"			—	Zul. in-Schweden		15	Lagerung in CLAB, Schweden
TN-SAB/G300 Pb	9	"			—			80	Lagerung in kern-technischen Anlagen
TN-SAB/G300	7	"			—			20	"
TN-SAB/G500	6	"			—			5	"
TN-SAB/G800	5	"			—			55	"
TN ROBE-Cont.	15	"			—			11	"
TN-SAB/G650 PbV	6	"			—			90	"
MOSAIK MIC	9	"			—			1	"
WACO II	20	"			—			12	"

Transportbehälterbauarten aus GGG-40 für hochradioaktiven Abfall
Tabelle 5 Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren Nov. '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
CASTOR Barre	101	12 Abs.Elem.			—				
CASTOR IIa	121	800 I HAWC			—				
HAWC					—				
CASTOR V	80	2000 I HAWC			—				
HAWC					—				
CASTOR GSF	22	5 HAW-Kokillen			—			8	
CASTOR 21 HAW	116	21 HAW-Kokillen			—			1	

Transportbehälterbauarten aus GGG-40 für die Endlagerung abgebrannter BE
Tabelle 6 Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren Nov. '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
POLLUX	65	8 PWR-BE (geschnitten u. gebündelt)			—	Forschung/Entwicklung		1	

Transportbehälterbauarten für abgebrannte Brennelemente und radioaktiven Abfall
Tabelle 7 Verkehrsrechtliches Zulassungsverfahren Mai '89

Bauart	Gesamt-Masse t	Inhalt	Abkling-zeit Jahre	Ab-brand MWd/t	Prüfungs-zeugnis in Be-arbeitung	Zu-lassung	Validie-rung	Muster her-gestellt	Erfahrungen/ Transporte
TN 7-Container	24	MTR-Fuel			—			1	
Goslar Container	11	MTR-Fuel			—			2	
Shielding Container A210/300 Pb/GFK	12	MTR-Fuel			—			1	
Breco KR 100/200	2	flüssige u. gasförmige radioaktive Stoffe			—			2	
AVR-Transport Container	10	HTGR-Fuel			—			1	
TN 7/2	24	MTR-Fuel			—		F. USA, CDN USA	2	
GNS 11	13	MTR-BE			—			2	
GNS 12	135	3 HAW Kokillen			—			4	

Dimensionen der Beschädigungen verursacht werden als beim 9 m-Falltest auf das unnachgiebige Fundament.

5.1.3 Fallversuche an Schwerbehältern aus großen Höhen

Den leichten Verpackungen, z. B. zum Transport von α -Strahlern, stehen die schweren Behälter, z. B. für γ - bzw. Neutronenstrahler, gegenüber. Letztere werden in der Regel Behälter zum Transport abgebrannter Brennelemente oder mittel- bzw. hochaktiven Abfalls sein.

Es galt, die Sicherheitsreserven derartiger Schwerbehälter gegenüber Unfallbeanspruchungen zu ermitteln, wie sie z. B. beim Absturz von hohen Brücken (bis 200 m) auftreten können, bzw. alle denkbaren Kollisionsgeschwindigkeiten im Landverkehr abzudecken.

Diese Schwerbehälter mit ihren starken Sphäroguß-, Blei- bzw. Stahlabschirmungen können Massen bis zu 100 t und mehr aufweisen. Daher sind Fallversuche an Originalbehältern nur bedingt möglich, da die Tragfähigkeit von Hubschraubern begrenzt ist.

Eine auszuwählende Aufprallfläche sollte in etwa mit einer Autobahn-Sträßendecke vergleichbar sein, welche ein einigermaßen repräsentatives reales, aber auch kritisches „Ziel“ darstellt.

Ein ca. 4 t schwerer Behälter (Modell 1 : 2 eines BE-Transportbehälters) wurde u. a. für praktische Versuche verwendet.

Für diese große Außenlast stellte dankenswerterweise die Heeresfliegerschule A der Bundeswehr in Bückeburg einen Hubschrauber vom Typ CH 53 samt Besatzung zur Verfügung.

Der Behälter fiel auf gewachsenen Boden und auf ca. 60 cm starke armierte Betonplatten. In keinem Fall konnte Verletzung der Integrität festgestellt werden. Durch „bubbel tests“ (Blasenprüfung) wurde eine noch große Dichtigkeit dokumentiert.

Die „Prüfungen zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit bei Unfällen während der Beförderung“ (IAEA, § 719 /1/) scheinen in der Tat geeignet, für schwere Transportbehälter im Landverkehr ein äußerst hohes Maß an Sicherheit zu gewährleisten. Dies wird erhärtet durch weitere bekanntgewordene Versuche, so z. B. aus Großbritannien:

- Eisenbahn-Aufprall-Versuch auf einen Brennelement-Transportbehälter der Bauart MAGNOX /21/,
- Fallversuche auf felsigen Untergrund mit Transportbehälter für best. MTR-BE (Material-Test-Reaktor-BE) /22/

zeigten, daß die durch reale schwere Unfallbedingungen verursachten Beschädigungen mit denen der IAEA Prüfanforderungen vergleichbar sind.

5.1.4 Simulation eines Flugzeugabsturzes auf einen Brennelementbehälter

Aus Gründen der Risikominimierung mußte für das deutsche atomrechtliche Lagerverfahren für die trockene Zwischenlagerung abgebrannter BE in Lagerbehältern ein Flugzeugabsturz in Betracht gezogen werden. Diese Unfallsituation wurde durch einen Beschußversuch simuliert. Das Projektil (ein Metallrohr mit festem Kern von 1t), durch eine spezielle Abschußvorrichtung auf ca. Schallgeschwindigkeit (300 ms^{-1}) beschleunigt, wurde auf einen Behälter der Bauart CASTOR IIA (verkürzte Version) geschossen.

Während der Aufprall des Projektils auf die Behälterwand nur minimale Deformationen der Kühlrippen verursachte, war der Aufprall auf die Mitte des Behälterdeckels schon kritischer. Der innere Deckel (Primärdeckel) hat jedoch seine geforderte Dichtheit bewahren können.



Bild 7: 4t-Modell eines BE-Behälters nach einem Fall aus 200m Höhe auf eine Betonplatte; Behälter weist keine wesentliche Beschädigung des eigentlichen Behälterkörpers auf und ist noch genügend dicht.

5.2 Ermittlung der Sicherheitsreserven durch gesteigerte thermische Beanspruchung

Die Transportvorschriften schreiben unter anderem vor, daß sogenannte Typ B-Behälter der Einwirkung eines halbstündigen Feuers von 800°C standhalten müssen. Der Nachweis kann experimentell und/oder durch Berechnung erfolgen.

Zur Ermittlung der Sicherheitsreserven hinsichtlich thermischer Beanspruchung ist daher die Einwirkung eines Schadensfeuers bis zum Versagen des Behälters zu steigern.

Als typischer Plutonium-Transportbehälter wurde der Transportbehälter für flüssige Plutonium-Nitrat-Lösungen (BAM-Zulassung D/DB-00 18 B) den erweiterten Versuchsbedingungen unterworfen. Es handelt sich hierbei um ein zugelassenes Baumuster, von dem nachfolgend 40 Stück in Serie gefertigt wurden. Diese Behälter werden alle regelmäßig für Transporte in der Bundesrepublik eingesetzt.

Der Behälter wurde für ca. 75 min. einem Schadensfeuer mit einer mittleren Temperatur von ca. 850°C ausgesetzt. Einen Eindruck vermittelt Bild 8.

Aufgrund der Temperaturmessungen während der Versuche und der danach erfolgten teilweisen Zerlegung und anschließender Untersuchung der Behälter

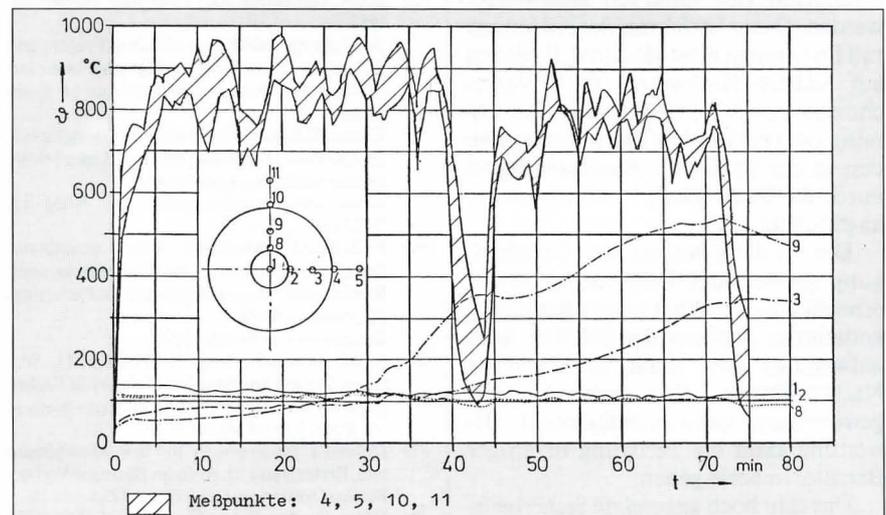
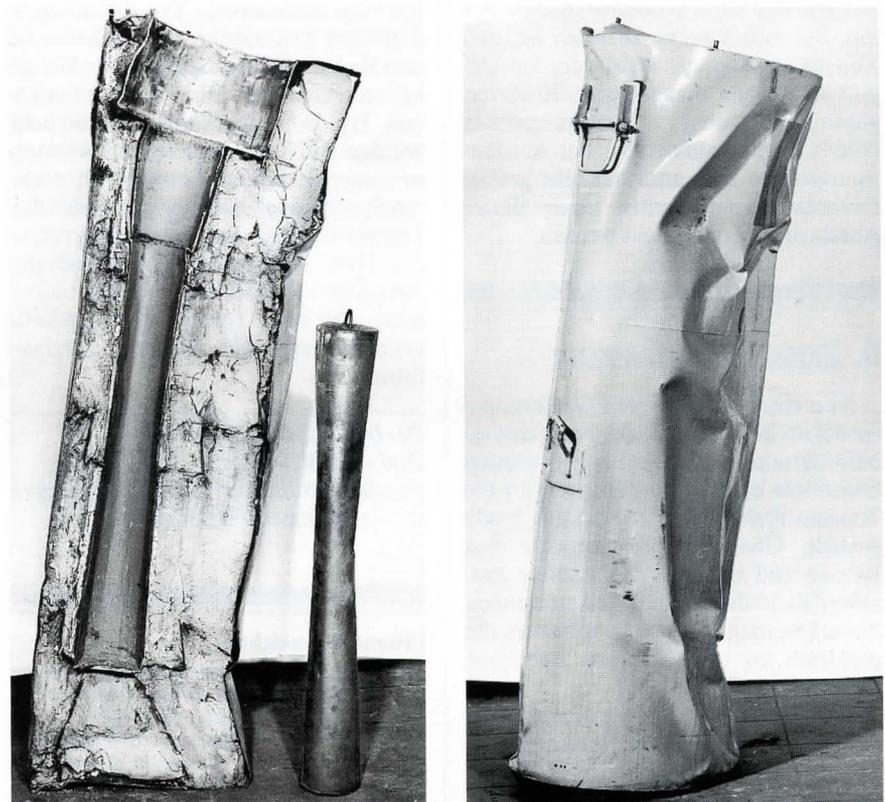


Bild 8: Gesteigerter Feuersversuch an 18 B-Behälter

terkomponenten kann davon ausgegangen werden, daß ein Versagen dieses Behältertyps in einem Schadensfeuer, d. h. das Bersten der Transportflasche durch inneren Überdruck als Folge der Erhitzung, auch bei vorher erfolgter mechanischer Verformung frühestens jenseits einer Branddauer von 75 min. erwartet werden muß. Ferner kann davon ausgegangen werden, daß das Behälterkonzept des Transportbehälters D/DB-00 18 B ohne vorherige mechanische Schädigung einem analogen Schadensfeuer von 150 min. widerstehen wird, ohne daß es zum Versagen des Behälters kommt.

Letztlich läßt sich die thermische Beanspruchung analytisch relativ gut beschreiben, so daß hier weniger die praktischen Versuche, sondern mehr die Berechnungen zum Ermitteln der Sicherheitsreserven heranzuziehen waren. Besonders hervorzuheben ist, daß Konstruktionen aus Stahl oder Sphäroguß sehr hoch anzusetzende Reserven gegenüber dem Auslegungsfeuer (800 °C, 0,5 h) aufweisen; bei Abschirmungen aus Blei muß bei sehr großer Feuerdauer ein Verlust eben dieser Abschirmung unterstellt werden.

6. Zusammenfassung

Von einem bestimmten Gefahrenpotential ab, hier ausgedrückt durch eine zu befördernde Aktivitätsmenge, werden besonders hohe Anforderungen an die Transportbehälter für radioaktive Stoffe gestellt. Über die üblicherweise den Betrieb und allenfalls den leichten Zwischenfall abdeckenden Anforderungen hinaus werden hier solche erhoben, die praktisch zu unfallsicheren Behältern führen.

Entsprechend § 701 der Empfehlungen der Internationalen Atomenergie-Agentur /1/ können für den Nachweis der Unfallsicherheit von sog. Typ B-Verpackungen vier Verfahren angewendet werden. Diese Verfahren A (Prüfungen mit Prototypen oder Mustern), B (Bezug auf frühere Nachweise), C (Untersuchungen mit Modellen) und D (Berechnung oder begründete Darstellung) werden in der Praxis bei Begutachtungen durch die BAM häufig in Kombination angewendet.

Der Umfang solcher, der Genehmigung vorlaufenden Untersuchungen ist erheblich und bedingt wegen des häufig komplexen Aufbaus der Behälter auch aufwendige und stark differenzierte Nachweisketten. Erst anhand dann gewonnener, zusammenfassender Bewertung kann die Fertigung derartiger Behälter in Serie gehen.

Das sehr hoch angesetzte Sicherheitsniveau der Transportbehälter dient als Ausgangsbasis für Behälter, die auch als

Lagerbehälter dienen sollen. Zusatzanforderungen für eine Lagerdauer von max. 40 Jahren der abgebrannten Brennelemente in Behältern bestehen im wesentlichen aus der Forderung nach einer zweiten Barriere im Deckel und der Langzeitbeständigkeit der verwendeten Materialien, besonders der Dichtungen.

Ein Überblick über die bedeutenden Behälterbauarten für abgebrannte Brennelemente und radioaktiven Abfall zeigt, welche Anstrengungen im vergangenen Jahrzehnt unternommen wurden, um einen Beitrag zum Entsorgungskonzept der Bundesrepublik Deutschland bereitzustellen.

Alle Transport- und Lagerbehälter der hier behandelten Art sind unfallsicher. Zur Verifikation wird aus einem 1979 abgeschlossenen Forschungsvorhaben /6/ berichtet, in dem durch gesteigerte, über die bestehenden Typ B-Prüfanforderungen hinausgehende mechanische und thermische Belastungen die Sicherheitsreserven der seinerzeit umlaufenden Typ B-Verpackungen untersucht wurden. Auch der Vergleich mit bekanntgewordenen Untersuchungen in anderen Staaten zeigt, daß hier im Bereich des Transportes und der Lagerung gefährlicher Güter für die radioaktiven Stoffe die stets gebotene Minimierung des Risikos auch vor dem Hintergrund größerer Gefahrenpotentiale erfolgreich durchgeführt wird.

*Dr.-Ing. B. Schulz-Forberg,
Dipl.-Ing. W. Kraus
Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM), Berlin*

Literaturverzeichnis

- /1/ Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, 1973 Revised Edition IAEA Safety Standards, Safety Series No. 6
- /2/ Empfehlung der Reaktorsicherheitskommission auf ihrer 148. Sitzung am 19. September 1979: Bundesanzeiger Nr. 42 vom 29. Februar 1980
- /3/ BAM, Gutachten Az.: 1.02/3022, November 1982
Beurteilung behälterspezifischer Fragen der trockenen Zwischenlagerung abgebrannter BE in einem Transportbehälterlager bei Gorbelen
- /4/ Wieser, K. E. u. a.: Gußeisen mit Kugelgraphit als Werkstoff für Transport- und Lagerbehälter bestrahlter Brennelemente.
Amts- und Mitteilungsblatt der BAM 15 (1985), Nr. 1, S. 4-18
- /5/ PTB/BAM: Merkblatt über qualitätssichernde Maßnahmen bei Herstellung und Betrieb von Verpackungen zur Beförderung radioaktiver Stoffe.
Braunschweig/Berlin, 1982
- /6/ BAM, Schulz-Forberg, B., Hübner, H. W.: Classification and Margins of Safety of Packagings for the Transport of Radioactive Materials. Final Report March 1979
- /7/ Dubbel's Taschenbuch für den Maschinenbau, Erster Band, 11. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1953
- /8/ Hütte. Des Ingenieurs Taschenbuch. Theoretische Grundlagen, 28. Auflage.
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1955

- /9/ Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, 1973 Revised Edition IAEA Safety Standards, Safety Series 37
- /10/ BAM, Labor 1.24
Baumusterprüfung an dem Modell Maßstab 1:2 und Prototyp einer Typ B-Verpackung zum Transport radioaktiver Stoffe vom Typ CASTOR Ia
Prüfungszeugnis Nr. 1.2/11450, 12. 03. 1980
- /11/ BAM, Labor 1.24
Baumusterprüfung an dem 1/2-Modell CASTOR Ia
Versuchsberichte Nm. 1.24/77- 81, 1.24/155, 156 u. 184
- /12/ BAM, Labor 1.02
Instrumentierte Fallversuche mit einem Brennelement-Transportbehälter, Typ CASTOR Ic
Versuchsbericht Nr. 1.02/189
- /13/ BAM, Labor 1.24
Fallversuche mit 1/2-Modell CASTOR IIa
Versuchsbericht Nr. 1.24/242, 243, 244 u. 255
- /14/ BAM, Labor 1.24
Prüfungszeugnis Az. 1.2/11856, 1.02/2298 vom 7. November 1983
- /15/ Schulz-Forberg, B., Neider, R. J. A.: Improvement of the IAEA Safety System - What is Necessary?
Vorgetragen auf dem „5. International Symposium Packaging and Transportation of Radioactive Materials“ (PATRAM '78), Las Vegas, Nevada 1978
- /16/ Christ, R. et al.
Fallversuche aus 20 m Höhe mit Modellen des Behältertyps TN-8
Bericht TN 7207, Hanau 1972
- /17/ BAM-1.2, Versuchsbericht Nr. 11015
„Fallversuch an 1/2-Modell des Behältertyps TN 8/9 ohne Stoßdämpfer aus 26,5 ft Höhe“, Berlin 1976
- /18/ Yoshimura, H. R., Schulz-Forberg, B. et al.
Extended Testing of a Modified 18 B Plutonium Nitrate Shipping Container“
Patram '80, Berlin 1980
- /19/ Droste, B.
“Safety evaluation of dry spent fuel storage casks”. USSR-FRG Experts Meeting, Leningrad, June 1988
- /20/ Wieser, K. et al.
Drop from the Reactor Building Crane - An Event Covered by the 9 m Drop Test Requirement?
Proceedings of PATRAM 1983, Oak Ridge, Dec. 1983
- /21/ Hart, J. D., Milne, I., Schears, M.
“The resistance to impact of spent MAGNOX fuel transport flasks”
Paper No. 10, Rail crush demonstration scenarios. MEP, London 1985
- /22/ Yoshimura, H. R. et al.
“A Crash Test of a Nuclear Spent Fuel Cask and Truck Transport System”
Saudia National Laboratories, Jan. 1978
- /23/ Richtlinien für die Zulassung des Baumusters von Versandstücken zur Beförderung radioaktiver Stoffe vom 18. 10. 1977
Verkehrsblatt, Heft 20, 1977, S. 582

Auflistung der in den Tabellen 1-7 enthaltenen Abkürzungen

Abs. Elem.	Absorber Elemente
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BE	Brennelement
BWR	Boiling Water Reaktor (Siedewasser-Reaktor)
HAW	High Active Waste (Hochradioaktiver Abfall)
HAWC	High Active Waste Concentrate
HTGR	High Temperature Gas-cooled Graphit-moderated Reaktor
LSA	Low Specific Activity
MOX	Mischoxid
MTR	Material-Testreaktor
PWR	Pressurized Water Reaktor (Druckwasser-Reaktor)
SCO	Surface Contaminated Objects