

STUDIE
ZU GEFAHREN BEIM TRANSPORT
VON HAW-KOKILLEN
ZUR ZWISCHENLAGERUNG
IN DER BRD

Auftraggeber:

Greenpeace e.V.

Auftragnehmer:

intac -
Beratung, Konzepte, Gutachten
zu Technik und Umwelt GmbH

Hannover, Februar 1996

Bearbeiter

Wolfgang Neumann (Dipl-Phys.)

intac - Beratung, Konzepte, Gutachten
zu Technik und Umwelt GmbH
Kleine Düwelstraße 21
30 171 Hannover
Tel.: 0511 / 85 30 55
Fax: 0511 / 85 30 62

GEFAHREN BEIM TRANSPORT VON HAW-KOKILLEN ZUR ZWISCHENLAGERUNG IN DER BRD

Studie, erstellt im Auftrag von Greenpeace e.V.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	2
2. HAW-KOKILLEN (INVENTARE, EIGENSCHAFTEN, PRODUKTKONTROLLE)	3
3. TRANSPORT- UND LAGERBEHÄLTER (BESCHREIBUNG, ANFORDERUNGEN, TESTS)	5
4. VERSAGENSMÖGLICHKEITEN UND FREISETZUNGEN BEI UNFÄLLEN	7
4.1 EIGENE BETRACHTUNGEN	7
4.2 UNFALLSZENARIEN IN DER LITERATUR	9
4.3 SCHLUßFOLGERUNGEN.....	13
5. RADIOLOGISCHE UNFALLFOLGEN	14
6. ZUSAMMENFASSENDER BEWERTUNG	16
LITERATURVERZEICHNIS	17
ABBILDUNGEN.....	20

1. Einleitung

Mit der am 2. Juni 1995 vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) erteilten sogenannten Nutzungserweiterungsgenehmigung für das Transportbehälter-Lager (TBL), kann der Standort Gorleben nun physisch in die bisher in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) betriebene „Entsorgungsstrategie Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente“ einbezogen werden. Es dürfen (vorbehaltlich des Ausgangs der zu erwartenden Prozesse) hochaktive verglaste Abfälle (HAW) aus dem Wiederaufarbeitungsprozeß eingelagert werden.

In den Wiederaufarbeitungsverträgen, die vor 1989 abgeschlossen wurden (sogenannte „Altverträge“), sind insgesamt 5.717 t SM kontrahiert [VDEW 1989]. In Abhängigkeit vom Abbrand der BE entstehen daraus zwischen 4.288 und 5.146 Kokillen mit verglasten Spaltprodukten. Gemeinsam mit den in La Hague ebenfalls verglasten Feedklärschlämmen ergibt das ein Gesamtgebundevolumen für La Hague und Sellafield von ca. 760 m³, das für mindestens 20 Jahre zwischengelagert werden muß [JANBERG 1992].

Das TBL in Gorleben ist die einzige Anlage in der BRD, die eine Genehmigung zur Annahme von HAW-Kokillen besitzt. Nach Angaben der Energieversorgungsunternehmen wird über ein Drittel der 420 Stellplätze im TBL für Behälter mit HAW benötigt. Zunächst werden 160 Stellplätze hierfür reserviert [DIBBERT 1992]. Die erteilte Genehmigung beschränkt sich jedoch auf die Annahme von Kokillen aus Frankreich. Die Frage, warum nicht die ebenfalls beantragte Einlagerung der britischen Kokillen genehmigt wurde, kann hier nur spekulativ beantwortet werden. Wahrscheinlich ist, daß es noch keine detaillierten Vereinbarungen zwischen BNFL und den bundesdeutschen EVU über die Modalitäten der Lieferung gibt (Behältertyp, Abfalltausch usw.). Da die Lieferung aus England aber noch nicht ansteht, besteht hierfür auch kein Zeitdruck.

Die Lieferung der Kokillen von der COGEMA aus La Hague sollte ursprünglich bereits 1990 beginnen. Aus verschiedenen Gründen, die hier nicht näher nachvollzogen werden sollen und sowohl in La Hague als auch in der BRD ihren Ursprung haben, hat sich dies verzögert. Nach konkreten Ankündigungen für den Oktober 1994, dann für April 1995 und schließlich August/September 1995 ist nun von Frühjahr 1996 die Rede. Nach bisherigen Ankündigungen soll der erste Transport in einem Behälter vom Typ TS 28 V durchgeführt werden. Die zwei nächsten Lieferungen sollen dann in Castor HAW-20/28 erfolgen. Darüber hinaus liegen keine Angaben vor. Es ist allerdings bekannt, daß bisher die Fertigung von 10 Behältern TS 28 V in Auftrag gegeben worden ist. Bis 2003 sollen nach den geltenden Vereinbarungen alle aus der Wiederaufarbeitung nach den „Altverträgen“ stammenden HAW-Kokillen aus Frankreich in die BRD geliefert sein. Für die HAW-Kokillen aus Sellafield von BNFL ist ein Lieferzeitraum von 2000 bis 2004 vorgesehen.

Keine Angaben gibt es bisher, wieviele der Transport- und Lagerbehälter mit 28 Kokillen und wieviele mit 20 Kokillen beladen aus der Wiederaufarbeitung kommen. Dies ist unter anderem vom Abbrand des Kernbrennstoffes und von der Spaltstoffbeladung des Glases abhängig. Wären alle Behälter mit 28 Kokillen beladen, würden allein aus den Altverträgen bei eher niedrigem Abbrand 158 Behälter und bei 20 Kokillen 222 Behälter zu erwarten sein. Diese Zahlen können sich erhöhen, wenn in diesem Zeitraum bereits HAW-Kokillen aus der Wiederaufarbeitung im Rahmen der nach 1989 abgeschlossenen Verträge zurückgeliefert werden. Hierzu liegen uns derzeit ebenfalls keine Angaben vor.

Bei einer Beladung der Behälter mit jeweils 28 HAW-Kokillen bedeutet dies für die Zahl der Transporte zum TBL:

1997 - 2003 ca. 15 bis 16 Transporte pro Jahr aus Frankreich
2000 - 2004 5 bis 6 Transporte pro Jahr aus Großbritannien.

Verkehrsträger bei der Beförderung der HAW-Gebinde von La Hague zum TBL sind Schiene und Straße. Folgender Transportweg in der BRD kann nach gegenwärtigem Stand als wahrscheinlich angesehen werden:

Mit der Deutschen Bahn im Regelgüterverkehr die Hauptstrecke aus Südwesten (Trier, Koblenz, Köln, Hamm) zum Rangierbahnhof Hannover/Seelze, weiter zum Rangierbahnhof Maschen, von dort zum Rangierbahnhof Lüneburg und weiter zum Bahnhof Dannenberg-Ost. Dort wird der Umschlag auf LKW vorgenommen und dann der Transport über die L256 nach Gorleben fortgesetzt.

2. HAW-Kokillen (Inventare, Eigenschaften, Produktkontrolle)

Inventare

Der Ausdruck HAW-Kokille beruht darauf, daß der hochaktive Abfall gemeinsam mit Glas als Schmelze in einen kokillenförmigen Stahlbehälter eingebracht wird. Der hochaktive Abfall enthält dabei etwa 98 - 99% der Aktivität, die vorher in den bestrahlten Brennelementen enthalten war. Sie wird hervorgerufen durch die bei der Kernspaltung im Reaktor entstandenen Spaltprodukte (hauptsächlich γ - und β -Strahler) und Transurane (hauptsächlich α -Strahler). Die von der COGEMA angegebenen Nominalwerte für das radioaktive Inventar einer Kokille können betragen [COGEMA 1986]:

$$\begin{aligned} &1,4 \times 10^{14} \text{ Bq an } \alpha\text{-Strahlern und} \\ &2,8 \times 10^{16} \text{ Bq an } \gamma\text{- und } \beta\text{-Strahlern} \end{aligned}$$

Die Halbwertszeiten dieser Radionuklide reichen bis zu 2 Millionen Jahren. Während die Nuklide mit kurzen oder mittleren Halbwertszeiten, z.B. der γ -Strahler Cs-137, für die hohe Strahlendosis und damit Gefahr während der Transport- und Zwischenlagerzeiten sorgen, sind die langlebigen Nuklide, z.B. die α -Strahler Np-237 und Pu-239, für die Probleme mit der Langzeitsicherheit bei der späteren Endlagerung verantwortlich. Von Bedeutung ist auch das Isotop Cm-244, das für die Neutronenstrahlung verantwortlich ist.

Das hohe Aktivitätsinventar an γ -Strahlern erzeugt auch eine hohe Ortsdosisleistung der Strahlung an der Oberfläche der Kokillen. Sie darf bis zu 14×10^3 Sv/h betragen [COGEMA 1986].

Eigenschaften

Folgende physikalischen und chemischen Eigenschaften des Glases sind für die Sicherheit beim Transport besonders relevant:

Die mechanische Stabilität des Glaskörpers bei normaler Umgebungstemperatur ist für das Verhalten bei Unfällen während des Transportes, der Handhabung im Zwischen- oder Endlager und der Zwischenlagerung selbst wichtig. Das Bruchverhalten ist entscheidend für die mögliche Freisetzungsrates nach einem Unfall, je feiner die Fragmentierung, je größer die Freisetzungen.

Der Glaskörper muß eine hohe Strahlenresistenz aufweisen. Durch die hohe Strahlendosis darf es zu keinen Zersetzungsprozessen kommen, die die mechanische Festigkeit des Glaskörpers schwächen.

Die Flüchtigkeit der Radionuklide aus dem Glaskörper muß gering sein. Andernfalls besäße die Atmosphäre im freien Volumen der Kokille, ähnlich wie im Plenum von Brennstabhüllen, eine hohe Aktivitätskonzentration, die dann leicht freigesetzt werden kann.

Der Ausdehnungskoeffizient des Glaskörpers ist vor allem bei unfallbedingter Erwärmung von Bedeutung. Der Unterschied des Koeffizienten zu dem des Stahles der Kokille darf nicht zu groß sein, da es sonst durch die größere Ausdehnung des Glases zu einem vorzeitigen Versagen der Kokille kommt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Glaskörpers darf nur in möglichst geringem Umfang durch Risse oder Inhomogenitäten behindert werden. Andernfalls kommt es zu lokalen Temperaturerhöhungen, die Veränderungen der Glaseigenschaften und auch der Radionuklidverteilung bewirken können.

Von besonders hoher Bedeutung sind die kritischen Temperaturen des Glases. Sie müssen bei der Zwischenlagerung und während des Transportes beachtet werden und sind entscheidend für die Höhe der Freisetzungen nach Unfällen. Die COGEMA gibt die Temperaturen wie folgt an:

- Glastransformationstemperatur $T_G = 502^\circ\text{C}$ (Nachlassende Widerstandsfähigkeit),
- Glasdeformationstemperatur $T_D = 546^\circ\text{C}$ (Verschlechterung der Formstabilität des Glaskörpers),
- Glaskristallisationstemperatur $T_C = 610^\circ\text{C}$ (Nachlassende Einbindung der Radionuklide in die Glasstruktur),
- Flüssigglastemperatur $T_M = 1.160^\circ\text{C}$ (Glas ist flüssig bzw. sehr viskos).

Die experimentellen Prüfungen der COGEMA zur quantitativen Ermittlung der genannten Glaseigenschaften wurden überwiegend an Glassimulaten durchgeführt, deren Zusammensetzung und Herstellungsverfahren nicht dem aktuellen Stand entspricht. Darüber hinaus war das Glas zum Teil ohne Aktivitätsbeladung [HSK 1988].

Qualitäts- und Produktkontrolle

Von den Wiederaufarbeitungsfirmen muß eine Qualitätskontrolle durchgeführt werden, um die Einhaltung der Spezifikationen für die HAW-Kokillen und damit deren Transport- und Lagerfähigkeit nachweisen zu können. Bei der COGEMA finden jedoch nach der Analyse der Ausgangsstoffe (Abfallarten und Glaskomponenten) nur noch Überprüfungen von Prozeßparametern wie Temperatur, Durchflußrate und Zeit statt. Es ist also weder eine Probenahme aus der Schmelze, noch aus dem fertigen Glasprodukt vorgesehen. Die Bestimmung des Aktivitätsinventars einer Kokille kann daher, unter Berücksichtigung bestimmter Modellannahmen, nur rechnerisch durchgeführt werden, und zum Glaszustand können nur Aussagen aufgrund von Erfahrungswerten gemacht werden. Eine wirklich sichere Aussage zu bestimmten sicherheitsrelevanten Punkten, wie das nuklidspezifische Aktivitätsinventar, dem Zustand des Glaskörpers (z.B. Anzahl und Größe von Rissen) und bestimmte Glaseigenschaften, kann daher nicht für jede Kokille garantiert werden.

Vor allem der einwandfreie Glaszustand ist jedoch wesentlich dafür, daß die Höhe der Freisetzungen in der Folge von Unfällen begrenzt bleibt.

3. Transport- und Lagerbehälter (Beschreibung, Anforderungen, Tests)

Als Transport- und Lagerbehälter für die Kokillen aus La Hague sind zwei Behältertypen vorgesehen, der deutsche Castor HAW 20/28 und der französisch-deutsche TS 28 V. Sie können jeweils mit 20 oder 28 Kokillen beladen werden.

Der Castor HAW (siehe Abbildung 2) ähnelt in seinem Aufbau den Castor-Brennelementbehältern. Unterschiede bestehen durch die Abschirmungserfordernisse und die Handhabungsmöglichkeiten in den Wiederaufarbeitungsanlagen (Deckel, Radialrippen). Er hat einen Grundkörper aus Gußeisen mit einer Wanddicke von 410 mm. Primär- und Sekundärdeckel besitzen jeweils eine Elastomer- und eine Metaldichtung. Damit besteht hier ein Unterschied zum BE-Castor, dessen Primärdeckel zwei Elastomer- und eine Metaldichtung besitzt. Während der Behälterkörper selbst die γ -Strahlung abschirmen soll, sind für die Neutronenabschirmung zwei versetzte Reihen Bohrungen in ihn eingebracht, in denen Polyäthylenstangen eingelassen sind. Die beiden Varianten für 20 bzw. 28 HAW-Kokillen unterscheiden sich nur in den Tragkorbkonstruktionen. Die maximal abführbare Wärmeleistung beträgt 45 kW [BLG 1992].

Der Grundkörper des TS 28 V besteht aus zwei Einzelteilen aus Schmiedestahl, einem dickwandigen Hohlzylinder und einer angeschweißten Bodenplatte (siehe Abbildung 3). Auf den Grundkörper sind Kupferstege befestigt, die wiederum den Behälteraußenmantel aus Stahl halten. Zwischen den Kupferstegen (zwischen Grundkörper und Außenmantel) befindet sich Neutronenmoderatomaterial. Der Primärdeckel besitzt eine Elastomer- und eine Metaldichtung, der Sekundärdeckel zwei Metaldichtungen. Beide Deckel sind aus Schmiedestahl. Die Dichtflächen sind Edelstahl-plattiert [HÜGGENBERG 1991]. Der Behälter ist beantragt für eine maximale Wärmeleistung von 43 kW [TÜV 1994b]

Von beiden Behältertypen wird in der Öffentlichkeit verbreitet, daß sie ein Zweibarrierensystem darstellen. Dies trifft jedoch grundsätzlich nicht zu. Beide haben nur einen Behälterkörper, dem wesentliche Rückhalteigenschaften zugeschrieben werden können. Beim TS 28 V wird das Zweibarrierenprinzip in noch eklatanterer Weise verletzt als beim Castor. Die oben erwähnte Schweißnaht ist eine mögliche Schwachstelle, die bei Unfällen zu früheren Freisetzungen führen kann. Für die Lagerung gibt es zumindest im Deckelbereich durch Primär- und Sekundärdeckel zwei Barrieren, für den Transport ist jedoch auch dies nicht geplant. Der zweite Deckel wird erst im Zwischenlager aufgesetzt. Zumindest für den TS 28 V wäre der Transport auch mit beiden Deckeln möglich [KIRCHNER 1990]. Gründe, warum der Transport zwecks Risikominimierung nicht mit beiden Deckeln durchgeführt wird, sind nicht bekannt.

Einen weiteren Schwachpunkt hinsichtlich Unfallgefahren stellt für beide Behälter die Konstruktion des Deckelbereiches dar. Im Gegensatz zu den Brennelementbehältern sind die Deckel nicht in den Kragen des Behälterkörpers eingelassen. Wie den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen ist, ist der Primärdeckel bei beiden Behältertypen auf den Grundkörper aufgesetzt. Der Sekundärdeckel wird dann quasi als Kappe noch darüber gestülpt [BLG 1992].

IAEA-Testbedingungen

Die von der IAEA festgelegten Testbedingungen entsprechen den in den bundesdeutschen Vorschriften festgelegten Anforderungen. Beide Behältertypen entsprechen der Kategorie B(U). Für diese muß nachgewiesen werden, daß sie

- einem Aufprall auf eine unnachgiebige Fläche aus 9 m Höhe,
- einem Aufprall auf einen Dorn aus 1 m Höhe,

- einem Feuer mit der Temperatur von 800 °C über 30 Minuten,
- dem Druck bei 15 m Wassertiefe 8 Stunden und
- dem Druck von 200 m Wassertiefe 1 Stunde widerstehen können [IAEA 1990].

Nach einem Report der US-amerikanischen Atombehörde werden diese IAEA-Bedingungen bei 0,6% der Straßen- und 1,3% der Bahnunfälle übertroffen. Nach einer Studie von "ECO-Engineering" werden häufig Flammentemperaturen von bis zu 1100 °C erreicht und bei Schiffstransporten Branddauern von einem Tag und mehr (zitiert in [LYMAN 1994]). Schiffstransporte spielen für die BRD allerdings erst bei der Lieferung von HAW-Kokillen aus Sellafield eine Rolle.

In den USA hat man offensichtlich schon Anfang der 80er Jahre über erhöhte Testbedingungen diskutiert (z.B. 910 °C über 2 Stunden). Die Diskussion wurde jedoch ohne Ergebnis abgebrochen. Letztendlich kann es jedoch nicht gelingen Maximalbelastungen abdeckend experimentell zu simulieren. Noch problematischer und zusätzlich negativ zu bewerten, ist der zunehmende Ersatz der Tests durch Rechnungen. Vor allem für Brände sind Computersimulationen inzwischen sehr beliebt, da hier die meisten Kosten gespart werden können. Damit wird die Verantwortung für die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen auf komplizierte Modellierungen und Berechnungen (z.B. zur Wärmeübertragung) übertragen. Die nicht ausreichende Belastbarkeit der Modelle wird von Lyman mit dem Beispiel für die Berechnung stationärer Temperaturprofile für Brennelementbehälter, wo die Abweichungen gegenüber Messungen bei z.T. 60 °C lagen, belegt [LYMAN 1994].

Durchgeführte Tests

Mit dem Castor HAW 20/28 wurden keine Tests durchgeführt. Die bereits durchgeführten Tests mit anderen Castor-Behältern werden als abdeckend angesehen (siehe [GÖK 1993c]). Dieses Argument kann evtl. für die Widerstandsfähigkeit des Behälterkörpers akzeptiert werden, für den Erhalt der notwendigen Dichtheit am Deckel jedoch nicht. Wie weiter oben beschrieben, sind Primär- und Sekundärdeckel nur aufgesetzt und darüber hinaus wird der Transport nur mit dem Primärdeckel durchgeführt. Damit sind sowohl für mechanische, als auch für thermische Belastungen andere Randbedingungen gegeben. Die Dichtheit (Einhaltung einer bestimmten Leckrate) des Behälters muß daher mit Fall- und Feuertests erneut nachgewiesen werden. Sollte während des Genehmigungsverfahrens ein rechnerischer Nachweis geführt worden sein, so ist dessen Aussagekraft aufgrund der komplizierten Modellierungen in Zweifel zu ziehen. Insgesamt ist damit aus unserer Sicht die Sicherheit des Castor HAW 20/28 nicht ausreichend nachgewiesen.

An dieser Einschätzung ändern auch in letzter Zeit durchgeführte Fallversuche nichts, die in [GOLLIHER 1992] und [BOUNIN 1995] beschrieben sind. Erstens weisen die dort untersuchten Behälter im Vergleich zum Castor HAW 20/28 Konstruktionsunterschiede auf. Zweitens dienen diese Versuche zum Nachweis der Bruchfestigkeit des Behälterkörpers und liefern damit keine Hinweise auf das Verhalten der Dichtungen.

Mit dem TS 28 V wurden 1989 Falltests mit 1/3-Modellen durchgeführt. Es handelte sich um 5 Tests aus 9 m und 1 Test aus 1 m Höhe in unterschiedlichen Orientierungen. Trotzdem die Tests mit Stoßdämpfern durchgeführt wurden, konnte für die im Behälterkörper auftretenden Spannungen nur ein Verbleiben im akzeptablen Bereich („acceptable range“) festgestellt werden. Diese Aussage ist sehr schwammig und könnte darauf schließen lassen, daß über die IAEA-Anforderungen hinaus kein besonderer Sicherheitsbereich existiert. Der Dichtungssitz erwies sich als besonders empfindlich unter den Stoßbelastungen, so daß hier konstruktive Veränderungen vorgenommen werden mußten [BOTZEM 1990]. Über die danach erneut vorgesehenen Falltests liegt uns nur die allgemeine Aussage vor, daß die

Leckrate von 10^{-6} Pa m³/s nicht überschritten wurde [KIRCHNER 1994]. Zu Feuer tests liegen keine Angaben vor.

4. Versagensmöglichkeiten und Freisetzungen bei Unfällen

Der Rahmen dieser Studie erlaubt keine eigenen detaillierten Untersuchungen zu den Freisetzungen aus Glaskörper, Kokille und Transportbehälter nach Unfallbelastungen. Hier soll auf Probleme bei mechanischen und thermischen Belastungen hingewiesen und soll in der Literatur beschriebene Untersuchungen für eine eigene Einschätzung herangezogen werden.

4.1 Eigene Betrachtungen

Aktivität in der Behälteratmosphäre ohne Unfall

Bereits ohne Unfall, gibt es begrenzte radioaktive Freisetzungen aus dem Glaskörper. Sie können sich zunächst im freien Volumen in der Kokille ausbreiten. Die Freisetzungsmenge unter Normalbedingungen ist abhängig von der Größe der Glasoberfläche. Hierfür sind wiederum nicht nur die geometrischen Abmaße des Glaskörpers relevant, sondern auch die Oberflächenvergrößerung durch Risse, die vor allem während des Abkühlungsprozesses bei der Herstellung entstanden sind. Eine Herstellung ohne Risse ist nicht möglich. Der Flächenvergrößerungsfaktor durch auftretende Risse beträgt etwa 10 [KAHL 1991].

Die Dichtheit der Edelstahlkokille ist kein von der COGEMA garantierter Parameter, d.h. sie darf selbst ohne mechanische Belastung nicht unterstellt werden. Entsprechend wird in der Literatur in der Regel auch von der Undichtigkeit mindestens einer Kokille im Transportbehälter ausgegangen (z.B. [SCHNEIDER 1980, PSE 1985, TÜV 1994a]). Daraus folgt, daß sich auch in der Atmosphäre des Transportbehälters Aktivität befindet. Die Aktivitätsmenge wird dabei durch die Sättigung der Atmosphäre bestimmt. Nach [BAM 1995] ist die Sättigung in den vorgesehenen Behältertypen unter den Bedingungen der Zwischenlagerung bereits durch die Freisetzung aus einem Glaskörper erreicht. Beim Transport kann es durch höhere Temperaturen und damit anderen Sättigungsbedingungen im Behälter zu einer größeren Aktivitätsmenge in der Atmosphäre kommen.

Mechanische Belastungen

Der Glaskörper ist relativ spröde. Bei einer mechanischen Belastung neigt er im Vergleich zu anderen Stoffen, z.B. Metall, leicht zur Fraktionierung. D.h. auf jeden Fall im äußeren Bereich wird er in viele verschieden große Teile zerbrechen. Damit kommt es auch zu Freisetzungen von Partikeln und Aerosolen aus dem Glaskörper. Für die Betrachtung von Auswirkungen in der Umgebung eines Unfallortes sind vor allem Aerosole mit einem Durchmesser $d < 10 \mu\text{m}$ relevant (lungengängig), da einerseits nicht mit einem flächenhaften Versagen des Transportbehälters zu rechnen ist, so daß Wegsamkeiten relativ klein sind und zum anderen diese auch die höchste Strahlenbelastung verursachen. Experimente mit inaktiven Glaskokillen haben ergeben, daß der Freisetzungsanteil bei einem Fall aus 10 m Höhe bzw. einer Aufprallgeschwindigkeit von 50 km/h aus dem Glaskörper 0,01% [SCHEIBEL 1988] und der Quellterm in die Umgebung $2 \times 10^{-4}\%$ [SCHEIBEL 1990] des Gesamtinventars beträgt. Für eine Geschwindigkeit von 288 km/h geben dieselben Autoren einen Quellterm von 0,1% des Gesamtinventars an. Der dominierende Parameter für die Fraktionierung war

dabei die Aufprallgeschwindigkeit. Alle anderen Einflüsse, auch der der Edelstahlkokille, waren vernachlässigbar.

Für die Edelstahlkokillen wurden bei den Fallversuchen starke Verformungen festgestellt [Scheibel 1990]. Systematische Untersuchungen über das Versagen der Edelstahlkokillen sind in der Literatur nicht beschrieben. Die Dichtheit der Kokillen ist auch kein von der COGEMA garantierter Parameter. Daher muß, je nach Unfallszenario, vom Verlust der Dichtheit für mehrere Kokillen ausgegangen werden.

Bei den möglichen Unfallbelastungen gehen wir hier davon aus, daß die Integrität des Transportbehälterkörpers erhalten bleibt, obwohl es bzgl. der Schweißnaht beim TS 28 V Bedenken gibt. Für die Deckeldichtung muß jedoch aufgrund der Konstruktion beider Behältertypen bei einem schweren Unfall bereits durch die mechanische Belastung mindestens eine starke Vorschädigung, wenn nicht gar ein Leck unterstellt werden.

Thermische Belastungen

Die mittlere Temperatur der HAW-Kokillen beim Abtransport in La Hague soll 400°C betragen. Die sicherheitstechnisch zulässige Temperatur unter Normalbedingungen wird mit 510°C und unter Unfallbedingungen mit 600°C angegeben [KIRCHNER 1990].

Bei der Diskussion um die Temperaturen ist zu beachten, daß ihre Berechnung (eine Messung ist im Behälter ausgeschlossen) äußerst problematisch ist.

- Ein wichtiger Parameter für die Berechnung, die Wärmeleitfähigkeit des Glases, kann von der COGEMA nur mit einer Genauigkeit von \uparrow 20% angegeben werden.
- Der Glaskörper ist, technisch bedingt, nie ideal homogen, d.h. es wird Risse und Ausscheidungen geben, die die nicht genau berechenbare Wärmeleitfähigkeit zusätzlich beeinflussen.
- Die Wärmeabfuhr aus dem Glaskörper durch die Stahlkokille an die Behälteratmosphäre und von dort durch die Behälterwand an die Umgebungsluft ist nur mittels sehr komplizierter Modellierungen zu berechnen, die zwangsweise Rechenänerungen enthalten.
- Zusätzlich wird die Modellierung durch die unterschiedliche Wärmeentwicklung der einzelnen Kokillen in einem Behälter erschwert.

Damit muß korrekterweise von Abschätzungen und nicht von Berechnungen gesprochen werden. Eine weiterführende Diskussion hierzu ist [GÖK 1993a] zu entnehmen.

Welche Bedeutung die nicht genau bestimmbare Temperatur einer HAW-Kokille im Zusammenhang mit den nicht notwendigerweise vorhandenen Sicherheitsabstand zwischen der zulässigen und der eigenschaftsverändernden Temperatur hat, wird an folgendem deutlich:

Bei einer Temperaturerhöhung verändert sich die Viskosität des Glases (Glas ist kein Festkörper), es wird weicher und die Diffusionsrate wird erhöht, wodurch mehr Radionuklide zur Oberfläche gelangen und von dort das Glas verlassen. Für Cs erhöht sich die Diffusionsrate z.B. um den Faktor 105 bei einer Temperaturerhöhung von 400°C auf 650°C [LYMAN 1994]. Cs ist also nicht sonderlich fest in die Glasmatrix eingebunden. Diese Zahlen zeigen, daß sich die vorgeschriebene Temperatur von 510°C bereits in dem Bereich befindet, wo Veränderungen der Glastruktur auftreten. Ab der von COGEMA mit 610°C angegebenen Kristallisationstemperatur beginnt bereits die Entglasung der Radionuklide.

Kommt es zu einem Unfall bei dem die Wärmeabfuhr aus dem Transportbehälter für längere Zeit unterbrochen ist, so kann die Temperatur der HAW-Kokillen auf über 510°C ansteigen. Bei einem schweren Transportunfall mit Brandfolge können die Temperaturen im

Behälterinnenraum durch die nicht mehr mögliche Wärmeabfuhr soweit steigen, daß auch ein stellenweises Flüssigwerden des Glases nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann.

Probleme mit Temperaturen gibt es auch noch in anderer Hinsicht. Die Auslegungstemperatur der Transport- und Lagerbehälter für Störfälle beträgt 800 °C bei allseitigem Wärmeeintrag. Ein diese Bedingungen übertreffender Stör- oder Unfall kann aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 3.). Er besitzt zwar keine hohe Wahrscheinlichkeit, aber in US-amerikanischen Studien wurde die Möglichkeit für den Transport belegt. In diesem Fall können die Dichtungen des Behälters versagen und so Freisetzungspfade für Radionuklide entstehen. Ein Versagen ist noch eher möglich, wenn eine mechanische Vorschädigung der Dichtung unterstellt wird. Dies wäre höchst problematisch, wenn sich die Innentemperatur des Behälters und auch die Temperatur der Glaskörper ebenfalls auf 800 °C erhöhen würde. Das Glas hat bei dieser Temperatur nur noch eine geringe Rückhaltefähigkeit für Radionuklide wie Cs-137 und die Stahlkokille wird nach den Spezifikationen der COGEMA nicht als Aktivitätsrückhaltebarriere garantiert. Daher könnte ein großer Teil des radioaktiven Inventars, das aerosolförmig, also praktisch als Gas, durch die entstandenen Dichtungslücken entweichen kann, in die Umgebung gelangen. Die Auswirkungen würden hauptsächlich durch das Radionuklid Cs-137 bestimmt werden.

4.2 Unfallszenarien in der Literatur

WASH 1535 (1974)

Im Rahmen der Forschungen zum Brüterprogramm der USA wurden auch mögliche Auswirkungen auf die Umwelt durch den Transport hochaktiver Abfälle untersucht. Das konstruierte Unfallszenario beinhaltete einen zweistündigen Brand mit Temperaturen um 800 °C, dem der Transportbehälter von einer Seite her ausgesetzt war. Die Temperatur im verfestigten HAW stieg nach den durchgeführten Berechnungen von 500 °C unter normalen Transportbedingungen auf 716 °C nach 2 Stunden thermischer Belastung. Die Autoren unterstellen jedoch, daß Freisetzungen erst oberhalb der Fertigungstemperatur des HAW-Abfallproduktes ab ca. 900 °C möglich sind [WASH 1974].

Bewertung in Bezug auf die bevorstehenden Transporte in der BRD:

Die Untersuchung zeigt, daß selbst bei nicht einhüllendem Feuer die Temperatur der Kokillen bereits nach 2 Stunden stark ansteigt. Die weiteren Schlußfolgerungen sind für die aktuelle Diskussion in der BRD nicht verwendbar. Die wichtigsten Gründe hierfür sind, daß

- ◆ keine kombinierte Belastung (mechanisch/thermisch) berücksichtigt wird,
- ◆ die Flammentemperatur nur mit 800 °C angesetzt wird,
- ◆ die Kokille als dichte Umschließung bewertet wird, die nicht versagt und
- ◆ Freisetzungen erst ab der Herstellungstemperatur des Glaskörpers unterstellt werden.

Risikoanalyse Schneider (1980)

Im Rahmen einer Dissertation wurde eine Risikoanalyse über den Transport hochaktiver Abfälle in der BRD durchgeführt [SCHNEIDER 1980]. Die hierbei entwickelte Methodik bildete die Grundlage für weitere, in den folgenden Jahren durchgeführte probabilistische Betrachtungen des Transportproblems in der BRD.

Das der Analyse zugrunde gelegte Borsilikatglas ist in seinen Eigenschaften dem von COGEMA hergestellten Glas ähnlich. Volumen und Masse der Glaskokille sind kleiner als bei der COGEMA-Kokille, entsprechend ist auch das Aktivitätsinventar einer Kokille geringer. Für Cs-137 beträgt es $3,2 \times 10^{15}$ Bq und ist damit etwa halb so hoch.

Als Transportbehälter wurde von Schneider der TN 12 herangezogen, der dem TS 28 V ähnlich ist. Er besitzt auch nur einen Deckel, der aufgesetzt ist. Sein Fassungsvermögen beträgt 27 Kokillen und das Gesamtaktivitätsinventar pro Behälter $3,8 \times 10^{17}$ Bq, davon $8,6 \times 10^{16}$ Bq Cs-137. Die Versagensgrenzen bei Unfällen wurden konservativ knapp über den IAEA-Anforderungen festgelegt.

Im folgenden werden drei der betrachteten Unfallszenarien wiedergegeben, die vom Autor prinzipiell als möglich, aber für relativ unwahrscheinlich gehalten wurden. Für eine 340 km lange Transportstrecke in Norddeutschland wird die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall mit Freisetzungen mit $W = 6,06 \times 10^{-5}$ angegeben.

- Der Unfall A1 beinhaltet eine mechanische Belastung des Behälters bei einem Bahnunfall mit einer Geschwindigkeit von > 80 km/h. Durch den Aufprall auf eine harte Fläche wurde ein Versagen des Deckels unterstellt. Unter Berücksichtigung bestimmter Rückhalte-mechanismen wurde ein Freisetzungsanteil für radioaktive Partikel/Aerosole $< 20 \mu\text{m}$ von $1,2 \times 10^{-5}$ abgeleitet. Die daraus resultierende Strahlenbelastung für Personen über den Luftpfad ist mit maximal 5 rem (50 mSv) angegeben. Getrennt davon wird eine Belastung von 10 mSv/h durch Direktstrahlung bei Aufenthalt in 10 m Entfernung vom Behälter angegeben.
- Der Unfall A32 beinhaltet eine mechanische Belastung des Behälters nach einem Unfall mit einer Zuggeschwindigkeit von 120 km/h. Auch hier versagt der Deckel durch einen Aufprall auf eine harte Fläche. Zusätzlich wurde unterstellt, daß die Glasmatrix Defekte aufweist und bei einer Edelstahlkokille ein Materialfehler vorliegt, der zu einem Aufreißen der Kokille führt. Unter Berücksichtigung bestimmter Rückhalte-mechanismen wurde ein Freisetzungsanteil für radioaktive Partikel/Aerosole $< 20 \mu\text{m}$ von $1,2 \times 10^{-3}$ abgeleitet. Die daraus resultierende Strahlenbelastung über den Luftpfad ist mit 500 rem (5 Sv) angegeben. Getrennt davon wird eine Belastung von ca. 500 mSv/h durch Direktstrahlung bei Aufenthalt in 10 m Entfernung vom Behälter angegeben. Wegen dieser hohen Direktstrahlung wird die Evakuierung der Bevölkerung in einem Radius von 100 m empfohlen.
- Der Unfall EA1 beinhaltet zunächst eine mechanische Belastung des Behälters durch einen Aufprall mit einer Geschwindigkeit von über 50 km/h. Durch diesen Aufprall wird ein Versagen der Edelstahlkokille und der Dichtung im Deckelbereich unterstellt. Im Anschluß bricht ein Feuer aus, das 30 Minuten anhält und Flammentemperaturen von 800°C erreicht. Der ermittelte Freisetzungsbruchteil beträgt für Cs-137 $1,4 \times 10^{-4}$ und die resultierende Strahlenbelastung 29,3 rem (293 mSv).

Bewertung in Bezug auf die bevorstehenden Transporte in der BRD:

Die in [SCHNEIDER 1980] durchgeführten Unfallbetrachtungen sind relevant für die jetzt bevorstehenden Transporte in der BRD. Die für diese Risikoanalyse berücksichtigte Behälterkonstruktion des TN 12 weist große Parallelen zu der des TS 28 V auf. Auch die verwendeten Glassorten und die Aktivitätsinventare sind vergleichbar.

Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (1985)

Im Rahmen des Projektes Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE) 1979 bis 1985 wurde auch der Transport von HAW aus der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf (WAW) auf Schiene und Straße untersucht.

Das dort eingesetzte Glas unterscheidet sich in seiner Zusammensetzung von dem in La Hague produzierten. Hier kann nicht quantitativ festgestellt werden, wie sich das Bruchverhalten der Gläser unterscheidet, aber nach momentanen Kenntnisstand kann qualitativ von ähnlichem Verhalten ausgegangen werden. Die kritischen Temperaturen sind beim WAW-Glas deutlich höher, so daß für dieses eine geringere Freisetzungsrates durch thermische Belastungen zu erwarten ist. Insgesamt kann daher für die jetzt anstehenden Transporte, bei sonst gleichen Bedingungen, von einer größeren Freisetzung aus dem COGEMA-Glas einer Kokille ausgegangen werden.

Als Transportbehälter wurden in PSE die Typen Castor und TN 1300 unterstellt. Sie unterscheiden sich von denen für den Brennelementtransport nur durch andere Einsätze zur Aufnahme der Kokillen [PSE 1985]. In beiden Behältertypen sollten laut PSE nach damaligem Stand jeweils 12 Kokillen transportiert werden. Bei einer mechanischen Belastung durch einen Aufprall des Behälters mit mehr als 50 km/h wurde das Versagen von 6 Kokillen unterstellt (PSE 8).

In PSE wurde ein Versagen des Behälters selbst ausgeschlossen. Das Versagen der Dichtungen des Behälters bei einem Unfall wurde nur im Zusammenhang mit einem vorher vorhandenen Dichtungsdefekt unterstellt. Zu größeren Freisetzungen kam es dabei nach einer mechanischen Belastung (Aufprall des Behälters mit 50 bzw. 80 km/h) und anschließendem vierstündigem Feuer mit einer Temperatur von 800 °C. Dabei wurde für die Aufheizung des Behälters von einem während der ganzen Zeit intakten Stoßdämpfer ausgegangen und damit der Schutz des Deckelbereiches vor Wärmestrahlung unterstellt.

Die größte mögliche Freisetzung nach einem Bahnunfall beträgt bei einem Freisetzungbruchteil von ca. 10^{-3} für Cs-137 $1,25 \times 10^{12}$ Bq (PSE 7).

Bewertung in Bezug auf die bevorstehenden Transporte in der BRD:

Die Ausgangsbedingungen des PSE-Szenariums sind wesentlich restriktiver. Die wichtigsten Unterschiede sind

- die aufgrund der Glaseigenschaften (z.B. höhere kritische Temperaturen) für das PSE-Szenarium zu erwartende geringere Freisetzungsrates,
- im Unterschied zu den nun tatsächlich benutzten Behältern Castor HAW und TS 28 V ging man bei den Versagensuntersuchungen in PSE von zwei im Behälterkörper versenkten Deckeln aus und nicht von einem auf den Grundkörper aufgesetzten Deckel. Dieser Unterschied ist für die Versagensgrenzen von Bedeutung,
- die um den Faktor 1,4 geringere Cs-Beladung des Glases.

Lyman-Studie (1994)

Im Auftrag von Greenpeace International wurde von Lyman eine Studie zum Schiffstransport von HAW-Kokillen aus Frankreich und Großbritannien nach Japan erstellt.

Für den unfallfreien Transport wurde die Emissionsrate für Radionuklide in die Umgebung unter Berücksichtigung der zulässigen Leckrate abgeschätzt. Unter der Annahme eines Risses in einer Stahlkokille und bei Verwendung des Wertes aus einer DOE-Analyse für das Austreten von Radionukliden durch diesen Riß folgt eine Emission, die mehr als 3 mal höher ist, als die nach gegenwärtigen IAEA-Empfehlungen zulässige von $3,7 \times 10^5$ Bq/h (7,5 mal höher, wenn die neuen ICRP-Empfehlungen berücksichtigt würden).

Aufgrund der für Glas im Vergleich zu keramischem UO_2 -Brennstoff niedrigeren Temperatur, ab der große Teile der Matrix flüssig vorliegen (ca. 1150 °C gegenüber ca. 2000 °C), folgt für

HAW ein geringerer Sicherheitsabstand zur kritischen Temperatur für den Behälter, da die Behälter bzgl. der Wärmeabfuhr auslegung vergleichbar sind.

Es gibt für den Rückhalt von Radionukliden keinen Sicherheitsabstand zwischen der Temperatur der Glaskokille ab der größere Freisetzungen auftreten und der Versagenstemperatur des Transportbehälters. Beim Glas finden im Temperaturbereich 800-1200°C große Eigenschaftsänderungen statt, die für eine stark erhöhte bis fast vollständige Freisetzung der Radionuklide aus dem Glaskörper sorgen. Die Anforderungen an den Behälter gehen aber ebenso nur bis 800°C. D.h. bei Bränden, die mit Flammentemperaturen von 800°C über längere Zeit einwirken, kann es nach Lyman bereits zu großen Freisetzungen kommen.

Nach COGEMA passiert bei einem Unfall entsprechend den IAEA-Empfehlungen nichts, da die Glaskokille dann unter 600°C bleibt. Die Feststellungen von Lyman ergeben aber einen größeren Temperaturanstieg bei einem Feuer an Bord. Bei Temperaturen bis zu 1000°C kann die Stahlkokille bersten und die Behälterdichtung versagen. Allein für die anschließende Freisetzung von Cs aus einer Kokille mit einer Rate von 10^{11} Bq/h wird der IAEA-Höchstwert für Unfälle um den Faktor 50 (unter Berücksichtigung der neueren ICRP-Werte um 125) überschritten. Der nach IAEA erlaubte Wert für Cs beträgt $2,2 \times 10^9$ Bq/h bzw. $3,7 \times 10^{11}$ Bq in einer Woche.

Bewertung in Bezug auf die bevorstehenden Transporte in der BRD:

Die von Lyman ermittelten Emissionswerte sind nicht ohne weiteres auf bundesdeutsche Verhältnisse übertragbar.

- ◆ Die erlaubte Leckrate für den Dichtungsbereich von nach Japan transportierten HAW-Behältern beträgt $9,24 \times 10^{-4}$ Pa m³/s [Lyman 1994]. Nach bundesdeutschen Zwischenlagerbedingungen, und damit auch für den Transport, beträgt die zulässige Standard-Leckrate 10^{-6} Pa m³/s [BLG 1992]. D.h. die Leckrate in der BRD ist deutlich geringer, so daß hier auch bei Undichtheit einer Kokille keine Überschreitung des IAEA-Wertes zu erwarten ist.
- ◆ Die Versagensgrenzen der Dichtungen bei Unfallbelastungen sind in der BRD höher, da hier Metalldichtungen vorgeschrieben sind, während für Japan Kunststoffdichtungen reichen. Bei Feuertemperaturen über 1000°C und einer mehrstündigen Einwirkung ist dieser Unterschied jedoch nicht mehr so relevant. Dies gilt insbesondere, da Lyman auch keine mechanische Vorschädigung für den Deckelbereich unterstellt.
- ◆ Andererseits berücksichtigt Lyman die Barrierenfunktion der Stahlkokille sehr stark. Dies ist nach allen uns vorliegenden Unterlagen nicht gerechtfertigt, da COGEMA selbst ihr keine Rückhaltefunktionen zuschreibt, sondern die Existenz nur als zusätzliche Konservativität berücksichtigt.
- ◆ Daß Lyman Schiffsfeuer betrachtet, die i.d.R. länger anhalten als bei Unfällen mit LKW oder Eisenbahn, ist dagegen für die Übertragbarkeit nicht so problematisch, da Freisetzungsraten pro Stunde abgeleitet wurden und auch auf Festland von mehrstündigen Freisetzungen auszugehen ist (siehe z.B. [PSE 1985]).

GRS-Studie (1995 ff)

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) wurde vom Bundesumweltministerium mit der Durchführung einer Transportstudie zur „Rückführung von Wiederaufarbeitungsabfällen aus Frankreich“ beauftragt, die auch Unfallbetrachtungen zum HAW-Transport beinhalten soll. Die Arbeiten zu dieser Studie sind noch im Gange, weshalb bisher nur rudimentäre Ergebnisse vorliegen.

Es ist bisher nicht bekannt, welche Belastungen von Behältern und Kokillen durch einen Unfall unterstellt wurden und welche Auswirkungen bzgl. Freisetzungen angenommen

wurden. Den bisher veröffentlichten Ergebnissen ist lediglich zu entnehmen, daß Unfälle mit größeren Freisetzungen für relativ unwahrscheinlich gehalten werden (ca. 10^{-5} für alle HAW-Transporte aus Frankreich in die BRD). Die höchsten angegebenen effektive Dosen, die durch Unfallfreisetzungen ohne Gegenmaßnahmen hervorgerufen werden, betragen 40 mSv in Entfernungen bis 250 m und 10 mSv bis 1150 m vom Unfallort [SCHWARZ 1995]. Dies bedeutet jedoch nicht, daß keine höheren Belastungen auftreten können, da die Berechnungen bei der von der GRS festgelegten Wahrscheinlichkeitsgrenze von 10^{-7} abgebrochen wurden.

Bewertung in Bezug auf die bevorstehenden Transporte in der BRD:

Auch die Studie der GRS zeigt, daß Unfälle, die zu größeren Freisetzungen führen, möglich sind. Dabei treten nach GRS Belastungen auf, die den Störfallgrenzwert der Strahlenschutzverordnung (§28) für ortsfeste Anlagen fast ausschöpfen. Höhere Belastungen treten in der GRS-Studie deshalb nicht auf, weil Unfälle, die eine von der GRS festgelegte Wahrscheinlichkeit überschreiten, nicht mehr betrachtet werden.

Aufgrund der bisher veröffentlichten Daten aus der GRS-Studie lassen sich keine detaillierten Schlußfolgerungen für die hier vorgelegte Studie ziehen. Insbesondere vor dem Hintergrund der Kritik, die an der von der GRS allgemein gewählten Methodik (siehe z.B. [GRS 1991]) in [GÖK 1993b] und [BfK 1992] geübt worden ist.

4.3 Schlußfolgerungen

Aus den bisher zusammengestellten Angaben wird im folgenden eine qualitative Betrachtung zu einem möglichen Unfall mit Freisetzungen durchgeführt. Dabei wird nur das für die radiologischen Folgen relevanteste Radionuklid Cs-137 berücksichtigt. Als Inventar für eine Kokille wird der in den Spezifikationen festgelegte Garantiewert von $6,7 \times 10^{15}$ Bq angesetzt [COGEMA 1986].

Wir unterstellen für den unfallfreien Transport von HAW-Kokillen in der BRD keine nennenswerten Freisetzungen von Cs in die Umgebung. Allerdings muß bereits ohne mechanische oder thermische Belastung von der Undichtigkeit einer Kokille im Transportbehälter ausgegangen werden. Dies beruht auf einer statistischen Wahrscheinlichkeit von einer defekten Kokille pro 1500 hergestellten [PSE 1985] und ist insbesondere gerechtfertigt, weil die Dichtheit der Kokillen kein von der COGEMA garantierter Parameter ist. Daraus folgt direkt, daß die Atmosphäre im Transportbehälter radioaktiv belastet ist.

Bei einem Unfall mit mechanischen Belastungen des Transportbehälters ist eine Fraktionierung von Glaskörpern und damit eine Erhöhung der potentiell freisetzbaren Aktivität zu erwarten. Bei einem durch den Unfall ausgelösten Feuer kann durch Flammentemperaturen von über 1000°C und einer Branddauer von einigen Stunden die Rückhaltefähigkeit der Glasmatrix in den Kokillen stark reduziert werden und damit die freigesetzte Aktivitätsmenge drastisch erhöht werden. Der Massenverlust aus dem Glaskörper ist bei Freisetzungen direkt proportional zur Dauer der thermischen Einwirkung [SCHNEIDER 1980].

Das über den Verlust der Dichtheit hinausgehende Versagen der Edelstahlkokille (aufreißen) ist bei hohen Geschwindigkeiten möglich. Bei einer hohen thermischen Belastung kann die Kokille durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glas und Stahl auch bersten [LYMAN 1994]. Für einen schweren Unfall mit einer Aufprallgeschwindigkeit des Transportbehälters von 100 km/h kann von einem Versagen von mindestens 50% der Kokillen ausgegangen werden.

Für Geschwindigkeiten von 100 km/h ist auch fraglich, ob bei den HAW-Transportbehältern die Dichtheit im Deckelbereich erhalten bleibt. Spätestens wenn ein mehrstündiger Brand mit

Flammentemperaturen von 1000°C dazu kommt, muß aber ein Versagen der Behälterdichtung unterstellt werden (zu entsprechenden Unfallbetrachtungen siehe z.B. [GÖK 1990]).

Unter Heranziehung der Freisetzungsergebnisse von [SCHEIBEL 1990] für eine Aufprallgeschwindigkeit von 100 km/h (vereinfachender Weise wurde zwischen den dort angegebenen Werten linear interpoliert), des Versagens von 50% der Edelstahlkokillen und des nach [COGEMA 1986] maximal zulässigen Inventars, ergibt sich eine mögliche Freisetzung von mehr als 10^{13} Bq Cs-137 in die Behälteratmosphäre. Dies allein durch die mechanische Belastung. Durch die zusätzliche thermische Belastung über einige Stunden und die damit weiter nachlassende Rückhaltefähigkeit des Glases, erhöht sich die Aktivität in der Behälteratmosphäre weiter. Da dieser Effekt hier nicht quantifiziert werden kann, wird nur unterstellt, daß die thermische Belastung die in der Behälteratmosphäre vorhandene Aktivität vollständig in die Umgebung austreibt.

Dieser Quellterm von ca. 10^{13} Bq Cs-137 erscheint in dieser Größenordnung plausibel, wenn er mit dem in PSE ermittelten Quellterm verglichen wird. Der Quellterm von PSE ist zwar etwa um den Faktor 10 geringer, dies ist jedoch nachvollziehbar, wenn die in Kapitel 4.2 aufgezeigten Unterschiede berücksichtigt werden. Der Plausibilität widersprechen auch nicht die Ergebnisse der GRS (siehe auch Kapitel 5) und die Einschränkungen, die hier für die Übertragbarkeit der Lyman-Ergebnisse gemacht wurden. Bei Berücksichtigung der Einschränkungen können auch aus den Überlegungen von Lyman für einen schweren Unfall Freisetzungen von über 10^{12} Bq abgeleitet werden.

5. Radiologische Unfallfolgen

Die in Kapitel 4. abgeleitete Freisetzung von ca. 10^{13} Bq Cs-137 liegt in der Größenordnung der in [GÖK 1990] ermittelten Freisetzungen für einen schweren Unfall beim Transport bestrahlter Brennelemente. Werden die dort beschriebenen Szenarien 1 und 2 unter Berücksichtigung des Gesamt-Cs-Anteils auf die hier vorliegende Situation übertragen, so ergeben sich folgende Belastungen:

Trockene Witterung, Diffusionskategorie A

Die maximal errechnete effektive Dosis beträgt ca. 700 mSv für Erwachsene und 1000 mSv für Kleinkinder in 250 m Entfernung vom Unfallort.
Der Störfallgrenzwert nach §28, Abs.3 der Strahlenschutzverordnung von 50 mSv wird bis in ca. 1 km Entfernung vom Unfallort überschritten.
Aufgrund der Strahlenbelastungen ist für ein Gebiet bis in einigen 100 m Entfernung die Umsiedlung der BewohnerInnen erforderlich.

Neutrale Wetterlage mit Wash-out, Diffusionskategorie C

Die Bodenkontamination mit Cs beträgt in 1 km Entfernung ca. 6×10^6 Bq/m², in 10 km Entfernung ca. 5×10^5 Bq/m².
Der Störfallgrenzwert nach §28, Abs.3 der Strahlenschutzverordnung von 50 mSv wird noch in 15 km Entfernung vom Unfallort überschritten.
Aufgrund der Strahlenbelastungen ist für ein Gebiet bis in ca. 5 km Entfernung die Umsiedlung der BewohnerInnen erforderlich. Bis in knapp 200 m Entfernung ist eine Evakuierung von Kindern durchzuführen.

Bei den hier angegebenen Dosiswerten ist zu berücksichtigen, daß sie mit den bis 1994 gültigen Transferfaktoren der Störfallberechnungsgrundlagen errechnet sind. Bei Berücksichtigung der jetzt gültigen Verordnungen würden sich die Belastungen erhöhen.

6. Zusammenfassende Bewertung

Das in Kapitel 4.3 aufgestellte Unfallszenario ist an den methodischen Ansatz des Konzeptes zum maximal glaubhaften Unfall angelehnt. Auf der einen Seite werden alle nicht eindeutig bewiesenen oder nicht garantierten, aber plausiblen Einflüsse als möglich unterstellt. Z.B. wird das Versagen von Kokillen und der Integritätsverlust des Transportbehälters im Deckelbereich unterstellt. Andererseits wird jedoch nicht für jeden einzelnen Parameter die pessimistischste Annahme berücksichtigt. Der Ansatz der probabilistischen Risikoanalyse ist für die Bewertung des Gefährdungspotentials von Transporten hochradioaktiver Abfälle nicht aussagekräftig. Er beinhaltet die Gefahr, die Folgen von schweren Unfällen mit großen Auswirkungen durch gleichzeitige Berücksichtigung von Unfallwahrscheinlichkeit und Strahlenbelastung zu verharmlosen. Diese Einschätzung wird auch von Lyman vertreten.

Die für den beschriebenen Unfallablauf möglichen radiologischen Folgen müssen als schwerwiegend bezeichnet werden. Für den Fall, daß HAW-Kokillen zur Langzeitzwischenlagerung in die BRD transportiert werden sollen, müssen aus Gründen der Unfallsicherheit beim Transport Maßnahmen getroffen werden, die zu einer deutlichen Verringerung möglicher Unfallfolgen führen. Dies ist u.a. durch das Minimierungsgebot im §28 der Strahlenschutzverordnung geboten. Es sind daher zwei Voraussetzungen zu erfüllen:

- ◆ *Die Einhaltung der bisher mehr oder weniger theoretisch abgeleiteten Glaseigenschaften muß für jede einzelne HAW-Kokille nachgewiesen sein, um eine andernfalls noch höhere Freisetzungsmenge als die hier abgeleitete zu verhindern. Hierzu sind zum einen möglichst realitätsnahe experimentelle Nachweise notwendig, die die Eigenschaften grundsätzlich bestätigen. Zum anderen muß durch eine direkte und aussagekräftige Produktkontrolle die Einhaltung der Eigenschaften im kommerziellen Herstellungsbetrieb garantiert werden.*
- ◆ *Die Möglichkeiten für Freisetzungen radioaktiver Stoffe müssen verringert werden. Zwei relativ einfach umzusetzende Maßnahmen wären zum Beispiel, bereits den Transport mit beiden Behälterdeckeln durchzuführen und eine Geschwindigkeitsbegrenzung für den Zug festzulegen.*

Die Planungen von COGEMA, bundesdeutschen Energieversorgungsunternehmen und Bundesumweltministerium für den Transport der HAW-Kokillen in die Bundesrepublik bieten keine ausreichende Gewähr für Sicherheit. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist ein Transport unter den in dieser Studie zu berücksichtigenden Gesichtspunkten daher abzulehnen.

Literaturverzeichnis

- BAM 1995 Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; „Sicherheitstechnische Beurteilung der Behälterbauart TS 28 V...“, 9.3/20 294; erstellt im Auftrag des BfS; Berlin, Januar 1995
- BfK 1992 Beirat für Fragen des Kernenergieausstiegs beim Niedersächsischen Umweltministerium; „Identifizierung von Schwachstellen der GRS-Transportstudie Konrad“; H. Hirsch; Hannover, Juli 1992
- BfS 1995 Bundesamt für Strahlenschutz; „Aufbewahrungsgenehmigung für das Transportbehälterlager Gorleben“, ET 3.3-2.1.1.13; Salzgitter, 02.06.1995
- BLG 1992 Brennelementlager Gorleben GmbH; „Transportbehälterlager Gorleben - Sicherheitsbericht“; Dezember 1992
- BOUNIN 1995 D. Bounin und M. Rosenau; „Fracture Mechanics Aspects In The Safe Design Of Ductile Iron Shipping And Storage Containers“; Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik, Nürnberg, 16.-18.05.1995, S.239
- BOTZEM 1990 W. Botzem and G. Sert; „Impact Testing Of The High Capacity Transport And Storage Cask TS 28 V For Vitrified High Level Waste“; Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik; Nürnberg, 15.-17.05.1990; S.333
- COGEMA 1986 Compagnie Gènèrale des Matières Nucléaires; „Specifications of Vitrified Residues Produced from Reprocessing at UP-2 or UP-3 La Hague Plants“; Second Series, July 1986
- DIBBERT 1992 H.-J.Dibbert und E. Passig; Zum Stand der Entsorgung deutscher Kernkraftwerke durch Verträge mit COGEMA und BNFL; Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik; Karlsruhe, 5.-7. Mai 1992
- GOLLIHER 1992 K.G. Gollither et. al; „Report on the Joint USA-Germany Drop Test Program for a Vitrified High Level Waste Cask“; PATRAM'92, Vol. 3, S.1123; Yokohama (J), Sept. 13-18, 1992
- GÖK 1990 Gruppe Ökologie; Gutachten zur Sicherheit von Kernbrennstofftransporten auf dem Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg; erstellt im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg; Hannover, März 1990
- GÖK 1993a „HAW-Kokillen“; Stellungnahmen für Einwendungen und zur Vorbereitung auf den Erörterungstermin zum TBL-Genehmigungsverfahren; erstellt im Auftrag von Greenpeace e.V.; Hannover, 1992/93
- GÖK 1993b Gruppe Ökologie; „Stellungnahme zum Transport radioaktiver Stoffe in Niedersachsen - Phase I -“; erstellt im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums; Hannover, November 1993

- GÖK 1993c Gruppe Ökologie; „Vorbereitung und Ergebnisse des Erörterungstermins zum TBL Gorleben“; erstellt im Auftrag von Greenpeace e.V.; Hannover, September 1993
- GRS 1991 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH; „Transportstudie Konrad“; GRS-A-1755/I; Köln, Juni 1991
- HSK 1988 Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK) im Bundesamt für Energiewirtschaft der Schweiz; Gutachten zur Spezifikation verglaster hochaktiver Abfälle aus Wiederaufarbeitungsanlagen der COGEMA; HSK 21/33; Juni 1988
- HÜGGENBERG 1991 R. Hüggenberg et. al; „Behälter für verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen“; Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik, 14.-16.05.1991, Bonn, S.269
- IAEA 1990 International Atomic Energy Agency; Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1985 Edition as amended 1990; Safety Series No. 6, Vienna 1990
- JANBERG 1992 K. Janberg, H.-J. Schlesinger und R. Weh; Rücknahme der Abfälle aus Wiederaufarbeitungsverträgen; Tagungsbericht der Jahrestagung Kerntechnik; Karlsruhe, 5.-7. Mai 1992
- KAHL 1991 L. Kahl et al.; „Investigation of the thermal behaviour of high level waste glass in steel canister during cooling and at equilibrium“; NEDEA 130 (1991), S.77
- KIRCHNER 1990 B. Kirchner and G. Sert; „TN 28 V High Capacity Cask For The Transport And Storage Of Vitrified Wastes“; Proceedings of High Level Radioactive Waste Management; ANS, La Grange (IL), 1990
- KIRCHNER 1994 B. Kirchner and H. Leers; „Taking it all back home“; nucl. engineering Int., Vol 39 No 482; September 1994, S.46
- LYMAN 1994 E.S. Lyman; „Safety issues in the sea transport of vitrified high-level radioactive waste to Japan“; Princeton University, New Jersey (USA); December 1994
- PSE 1985 Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung; Abschlußbericht, Fachband 7 (Sicherheitsanalyse der Transporte von radioaktiven Materialien für den Verkehrsträger Schiene) und Fachband 8 (Sicherheitsanalyse der Transporte von radioaktiven Materialien für den Verkehrsträger Straße); erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie; Berlin, Januar 1985
- SCHEIBEL 1988 H.-G. Scheibel, V. Friehmelt und H. Fröhlich; „Bruchverhalten und Aerosolbildung beim Absturz von Gebinden mit hochradioaktivem Abfall im Endlager“; Tagungsband der Jahrestagung Kerntechnik, 17.-19.05.1988 in Travemünde, S.329
- SCHEIBEL 1990 H.-G. Scheibel, V. Friehmelt und H. Fröhlich; „The Fracture And Aerosol Release Of Impacted HLW-Glasses Due To Accidental Canister Drops In A Disposal Site“; NEDEA 118 (1990), S.133

- SCHNEIDER 1980 K. Schneider; „Transport hochradioaktiver verglaster Spaltprodukte mit der Eisenbahn“; Dissertation; RWTH Aachen, November 1980
- SCHWARZ 1995 G. Schwarz et. al; „Rückführung von Wiederaufarbeitungsabfällen aus Frankreich“; 19. GRS-Fachgespräch, Seminar C; Berlin, 26.10.1995
- TÜV 1994 a Technischer Überwachungs-Verein Hannover/Sachsen-Anhalt; „Gutachten zum Transportbehälterlager Gorleben - Lagerung von HAW-Glaskokillen in Behältern vom Typ CASTOR HAW-20/28“; erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Hannover, Juni 1994
- TÜV 1994 b Technischer Überwachungs-Verein Hannover/Sachsen-Anhalt; „Gutachten zum Transportbehälterlager Gorleben - Lagerung von HAW-Glaskokillen in Behältern vom Typ TS 28 V“; erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Hannover, Dezember 1994
- VDEW 1989 Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke; „Strategieüberlegungen zur Brennelemententsorgung und Verwertung von Plutonium und wiederaufgearbeitetem Uran“; Frankfurt/Main, September 1989
- WASH 1974 United States Atomic Energy Commission; „Liquid Metal Fast Breeder Reactor Program“, Volume II; WASH 1535; March 1974