

**Untersuchungen  
zur Sicherheit bei  
der Beförderung  
radioaktiver Stoffe**

Teil 3  
Abdeckungsgrad  
der Prüfbedingungen  
für Versandstücke



## Untersuchungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe

Teil 3  
Abdeckungsgrad  
der Prüfbedingungen  
für Versandstücke

Abschlussbericht zum  
Arbeitspaket 3

Holger Eberhardt  
Patrick Eich  
Florence-Nathalie Sentuc

August 2014

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben 3611R03300 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

**Deskriptoren**

Beförderung radioaktiver Stoffe, Transportvorschriften, Prüfbedingungen für Versandstücke, Unfallbelastungen, Abdeckungsgrad

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Prüfanforderungen der Transportvorschriften nach SSR-6 .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung verkehrsträgerspezifischer Studien.....</b>	<b>11</b>
4.1	Unfalldaten .....	11
4.2	Luft .....	13
4.3	See.....	21
4.4	Schiene .....	30
4.5	Straße.....	38
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung/Bewertung.....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>49</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>55</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>57</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>59</b>



# 1 Einleitung

Radioaktive Stoffe sind im verkehrsrechtlichen Sinne Gefahrgüter, von denen bei unsachgemäßer Handhabung und bei Transportunfällen Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung ausgehen können. Für die Beförderung gefährlicher Güter wurde daher ein internationales Regelwerk geschaffen, bei dessen Anwendung der sichere Transport dieser Güter grundsätzlich gewährleistet ist. Durch dieses international harmonisierte System von Vorschriften und Regelungen wurde in der Vergangenheit weltweit ein hohes Sicherheitsniveau bei der Beförderung radioaktiver Stoffe erreicht.

Die Sicherheit beim Transport von Versandstücken mit radioaktivem Inhalt wird in entscheidender Weise durch die Verwendung von Transportbehältern gewährleistet, für die klar definierte Auslegungsanforderungen bestehen. Mit steigendem Gefährdungspotenzial, d. h. in der Regel mit zunehmendem Aktivitätsinventar der Versandstücke, steigen auch die Prüfanforderungen an die Transportbehälter, die durch die international anerkannten Transportvorschriften nach den Safety Requirements No. SSR-6 der IAEA /IAEA 12/ festgelegt sind und die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen und/oder thermischen Beanspruchungen, vom zwischenfallfreien Routinetransport bis ggf. zum Transport unter Unfallbedingungen, abbilden. Durch die Verwendung eines abgestuften Sicherheitskonzepts soll gewährleistet werden, dass die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung selbst in Unfallsituationen einerseits durch die Begrenzung der transportierten Aktivitätsmenge und andererseits durch die Anforderungen an die radioaktiven Stoffe (z. B. in besonderer Form) sowie die Verwendung geeigneter Transportbehälter derart begrenzt bleibt, dass die Strahlenexposition von Personen als Folge eines Unfalls beispielsweise die effektive Dosis von 50 mSv nicht überschreitet.

Bei der Festlegung der Beanspruchungen, denen die Versandstücke standhalten müssen, wird zwischen folgenden Beförderungsbedingungen unterschieden:

- zwischenfallfreier Transport (Routine-Beförderungsbedingungen)
- kleinere Zwischenfälle (Normale-Beförderungsbedingungen)
- Unfälle (Unfall-Beförderungsbedingungen)

Beim zwischenfallfreien Transport werden lediglich Beanspruchungen unterstellt, die beispielsweise durch kleinere Stöße, Unebenheiten der Fahrbahn oder planmäßige Umladevorgänge erfolgen. Normale Beförderungsbedingungen beinhalten kleinere

Zwischenfälle, wie beispielsweise unsanftes Aufsetzen oder Beregnung des Versandstücks. Bei Unfall-Beförderungsbedingungen wird von einem schweren Unfallgeschehen ausgegangen, bei dem u. U. eine Kombination von erheblichen physikalischen Beanspruchungen auf das Versandstück einwirken kann. Unter derartigen Bedingungen werden nach den Safety Requirements No. SSR-6 der IAEO /IAEA 12/ mechanische, thermische und Wassertauchprüfungen durchgeführt, wie beispielsweise der 9 m-Falltest auf ein unnachgiebiges Fundament, die thermische Belastungsprüfung mit einem vollständig einhüllenden Feuer von 800 °C über 30 Minuten und die Wassertauchprüfung bei 15 m Wassertiefe für 8 Stunden.

Im realen Unfallgeschehen treten unterschiedlichste Unfallhergänge und Szenarien auf, die sich durch hoch dynamische Abläufe und eine große Bandbreite physikalischer Behältereinwirkungen auszeichnen können. Im Rahmen des Vorhabens SR3611R03300 wurden daher im Arbeitspunkt 3 (AP 3) „Untersuchungen zum Abdeckungsgrad der Prüfbedingungen für Versandstücke im Vergleich zu realen Transportunfällen“ durchgeführt.

Die Bewertung des Abdeckungsgrades der Prüfbedingungen setzt voraus, dass die physikalischen Unfallbelastungen für einen weiten Bereich von Unfallszenarien bekannt sind, um diese mit den Prüfanforderungen vergleichen zu können. Üblicherweise sind derartige detaillierte Informationen zu einzelnen Unfallabläufen in den Verkehrstatistiken nicht enthalten. Vorrangig für das öffentliche Interesse sind Fragestellungen nach der Zahl verletzter, bzw. tödlich verunglückter Verkehrsteilnehmer und die Identifikation der Unfallursachen, um gegebenenfalls geeignete Maßnahmen ergreifen zu können. Es existieren allerdings umfangreiche verkehrsträgerspezifische Studien zum Transport radioaktiver Stoffe, die eine Bewertung der beim Unfallgeschehen auftretenden Belastungen für unterschiedliche Unfallszenarien ermöglichen.

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine auszugsweise Darstellung und Auswertung der verfügbaren Unfalldaten und insbesondere der Veröffentlichungen, die Informationen enthalten, die als Grundlage für eine Quantifizierung der Unfallbelastungen dienen können. Für die Verkehrsträger Luft, See und Schiene wurden insbesondere die vorhandenen größeren Studien ausgewertet. Für den Verkehrsträger Straße wurden mit Hilfe der DEKRA eigene Untersuchungen zu Unfallbelastungen durchgeführt.



## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Anstrengungen zur Entwicklung eines international akzeptierten und standardisierten Satzes an Empfehlungen für die Verpackung und den Transport von radioaktiven Stoffen begannen kurz nach der Gründung der IAEA in den späten 1950er Jahren. Diese Anstrengungen führten zu den heutigen IAEA „Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material“, deren Anwendung ein hohes Maß an Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe gewährleisten soll.

### Historische Entwicklung der internationalen Transportvorschriften

Die historische Entwicklung verschiedener Anforderungen durch internationale Regelwerke zur Verwendung von Verpackungen und zur sicheren Beförderung radioaktiver Stoffe werden sehr übersichtlich in /POP 04/ und /POP 13/ dargestellt. Schon im Jahr 1957, dem Gründungsjahr der IAEA, wurden Überlegungen angestellt, ob und in welcher Form sich die Organisation mit dem Thema „Beförderung radioaktiver Stoffe“ befassen sollte. Im Jahr 1959 fasste das *United Nations Economic and Social Council* (ECOSOC) den Beschluss, einheitliche Prüfungen für Transportbehälter für spezielle Gefahrgüter oder Gruppen gefährlicher Substanzen festzulegen. Das *Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods* der UN hatte im Jahr 1956 die erste Version der *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods* herausgegeben und die IAEA wurde in diesem Zusammenhang damit beauftragt, Empfehlungen für den Transport radioaktiver Stoffe zu erstellen. Dies resultierte in der ersten Veröffentlichung der IAEA-Transportvorschriften *Safety Series No. 6* (SS-06) im Jahr 1961 /IAEA 61/, welche Anforderungen an Typ A und Typ B Versandstücke definiert. Die Anforderungen an Typ B Versandstücke wurden (qualitativ) so definiert, dass sie den größten anzunehmenden Unfallbeanspruchungen („maximum credible accident“) standhalten sollen.

In den folgenden Jahren wurden die IAEA-Transportvorschriften weiterentwickelt, was zu einer Quantifizierung der vormals qualitativen Anforderungen an Typ B Versandstücke führte. Die hierfür entwickelte Abfolge von Prüfungen wird erstmalig in der 1965 veröffentlichten Fassung der SS-06 /IAEA 65/ beschrieben. Die Abkehr von dem Konzept des „maximum credible accident“ war lt. /POP 13/ dem Umstand geschuldet, dass einerseits diese Forderung für kein anderes Gefahrgut angewendet und andererseits das Konzept als nicht eindeutig und unpraktikabel angesehen wurde.

In der Fassung der IAEA-Transportvorschriften aus dem Jahr 1973 /IAEA 73/ wurden erstmalig Aktivitätsgrenzwerte für Typ A Versandstücke festgelegt (A<sub>1</sub> und A<sub>2</sub>). 1985 erschien eine erheblich überarbeitete Fassung der SS-06 /IAEA 85/. Die Testanforderungen an einige Versandstückmuster erweiterten sich um eine dynamische Quetschprüfung und eine Tauchprüfung in tiefes Wasser. Außerdem wurden *radioaktive Stoffe mit geringer spezifischer Aktivität (LSA)* und *oberflächenkontaminierte Gegenstände (SCO)* und ihre Beförderung in unterschiedlichen *Industrierversandstücken (IP)* definiert.

1996 änderte sich die Bezeichnung der IAEA-Transportvorschriften in ST-1 /IAEA 96/ und später in TS-R-1. Zusätzlich wurden 1996 spezifische Vorschriften für Versandstücke, die Uranhexafluorid enthalten, festgelegt. Des Weiteren wurde das Typ C Versandstück und dessen Prüfanforderungen eingeführt, die für größere Aktivitätsmengen die speziellen Bedingungen beim Lufttransport besser abbilden sollten. 2012 erschien die bislang letzte Fassung der IAEA-Transportvorschriften unter der neuen Bezeichnung SSR-6 /IAEA 12/. Die Entwicklung der Nomenklaturen der Versandstücktypen sind in Tab. 2.1 zusammengefasst.

**Tab. 2.1** Zusammenfassung der Versandstücktypen in den unterschiedlichen Fassungen der IAEA-Transportvorschriften /POP 13/

Versandstücktyp	Fassung der IAEA-Transportvorschriften					
	1961	1964	1967	1973	1985	1996 und später
Exempt package/ leere Verpackung	x	x	x	x		
Excepted package (freigestelltes Versandstück)/ leere Verpackung					x	x
Strong, leak-proof package	x					
Strong industrial package		x	x	x		
IP-1					x	x
IP-2					x	x
IP-3					x	x
Typ A	x	x	x	x	x	x
Typ B	x	x	x			
Large radioactive source package	x	x	x			
Typ B(U)				x	x	x
Typ B(M)				x	x	x
Typ C						x

### 3 Prüfanforderungen der Transportvorschriften nach SSR-6

Hinsichtlich der Beanspruchung, die auf ein Versandstück einwirken kann, wird in den Transportvorschriften /IAEA 12/ zwischen drei Kategorien von Beförderungsbedingungen unterschieden:

- Routine-Beförderungsbedingungen (keine Zwischenfälle)
- Normale-Beförderungsbedingungen (kleinere Zwischenfälle)
- Unfall-Beförderungsbedingungen (Unfälle)

Versandstücke, die spaltbare Stoffe oder Uranhexafluorid enthalten, unterliegen darüber hinaus noch zusätzlichen Vorschriften.

Beim zwischenfallfreien Transport wird davon ausgegangen, dass die auf das Versandstück einwirkenden Beanspruchungen lediglich von planmäßig verlaufenden Umladevorgängen oder Stößen durch Unebenheiten während des Transports verursacht werden.

In der Kategorie Normale-Beförderungsbedingungen werden hingegen auch kleinere Zwischenfälle wie unsanftes Aufsetzen beim Umladen oder kleinere Stürze unterstellt. Zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit unter normalen Beförderungsbedingungen werden Prüfungen für Versandstücke vorgeschrieben. Diese sind:

- Eine Wassersprühprüfung
  - einstündige Beregnung mit einer Niederschlagsmenge von ca. 5 cm/h
- Eine Fallprüfung
  - Die Fallhöhe entspricht, abhängig von der Masse, der Form und dem Material des Versandstücks, 0,3 bis 1,2 m
- Eine Stapeldruckprüfung
  - Das Prüfmuster ist für einen Zeitraum von 24 h der höheren der beiden nachfolgenden Druckbelastungen auszusetzen:
    - einer Gesamtmasse, die dem Fünffachen der Höchstmasse des Versandstücks entspricht
    - dem Äquivalent von 13 kPa, multipliziert mit der senkrecht projizierten Fläche des Versandstücks
- Eine Durchstoßprüfung

- Senkrechter Fall einer Stange von 3,2 cm Durchmesser mit einem halbkugelförmigen Ende und einer Masse von 6 kg aus einer Höhe von 1 m auf das Prüfmuster

Die Prüfmuster des Versandstücks müssen der Fallprüfung, der Stapeldruckprüfung und der Durchstoßprüfung unterzogen werden, wobei in jedem Fall vorher die Wassersprühprüfung durchgeführt werden muss.

Die dritte Kategorie berücksichtigt hinsichtlich der Beanspruchungen auf das Versandstück auch schwere Unfallsituationen. Hier wird eine Kombination von Beanspruchungen unterstellt, die durch folgende Prüfungen abgebildet werden:

- Mechanische Prüfung
  - Fallprüfung II und (abhängig von Masse, Gesamtdichte und rad. Inhalt des Versandstücks)
    - Fall des Prüfmusters aus 1 m Höhe auf einen fest und senkrecht montierten Dorn mit einem Durchmesser von 15 cm, einer Länge von mindestens 20 cm und einer flachen Stirnfläche
  - Entweder Fallprüfung I
    - Fall des Prüfmusters aus 9 m Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament
  - Oder Fallprüfung III
    - Dynamische Quetschprüfung durch den Fall einer Masse von 500 kg aus 9 m Höhe auf das Prüfmuster
- Erhitzungsprüfung
  - Das Prüfmuster wird für 30 Minuten einer durchschnittlichen Temperatur von mindestens 800 °C ausgesetzt.
- Wassertauchprüfung
  - Das Prüfmuster wird für die Dauer von mindestens 8 h mindestens 15 m tief in Wasser eingetaucht (Überdruck von mindestens 150 kPa).
- Und (falls der Inhalt mehr als 105 A<sub>2</sub> beträgt und für Typ C Versandstücke) gesteigerte Wassertauchprüfung
  - Das Prüfmuster wird für die Dauer von mindestens 1 h mindestens 200 m tief in Wasser eingetaucht (Überdruck von mindestens 2 MPa).

Das Prüfmuster wird den kumulativen Wirkungen der mechanischen Prüfung und der Erhitzungsprüfung in dieser Reihenfolge ausgesetzt. Im Anschluss daran muss dieses

Prüfmuster oder ein gesondertes Prüfmuster den Einflüssen der Wassertauchprüfung(en) ausgesetzt werden.

Zusätzlich existieren weitergehende Prüfungen für die Versandstücke mit den höchsten Anforderungen, die sogenannten Typ C Versandstücke. Diese Prüfungen sind:

- Eine Eindring-/Zerreiprfung
  - Bei einer Masse des Versandstücks von weniger als 250 kg
    - Fall einer zylindrischen Stange – mit einer Masse von 250 kg und einem Durchmesser von 20 cm, dessen auftreffendes Ende ein Kreiskegelstumpf ist – aus einer Höhe von 3 m auf das Prüfmuster
  - Bei einer Masse des Versandstücks mindestens 250 kg
    - Fall des Prüfmusters auf die oben genannte zylindrische Stange aus einer Höhe von 3 m
- Eine gesteigerte Erhitzungsprüfung
  - Das Prüfmuster wird für 60 Minuten einer durchschnittlichen Temperatur von mindestens 800 °C ausgesetzt.
- Eine Aufprallprfung
  - Aufprall des Prüfmusters mit einer Geschwindigkeit von mindestens 90 m/s auf ein unnachgiebiges Fundament

Hierbei ist es erforderlich die Fallprfungen I und III für den Nachweis der Widerstandsfähigkeit unter Unfall-Beförderungsbedingungen (s.o.), die Eindring-/Zerreiprfung sowie die gesteigerte Erhitzungsprüfung nacheinander und in dieser Reihenfolge durchzuführen. Für die Durchführung der Aufprallprfung ist es gestattet ein gesondertes Prüfmuster zu verwenden.

In den Transportvorschriften /IAEA 12/ werden acht unterschiedliche Versandstücktypen definiert (vgl. auch Tab. 2.1), die, in Abhängigkeit der maximalen Aktivität bzw. der maximalen Aktivitätskonzentration, unterschiedlichen Anforderungen genügen müssen. Die Dosisleistung an der Oberfläche von Versandstücken darf unter Routine-Beförderungsbedingungen maximal 2 mSv/h betragen. Ausnahmen bilden freigestellte Versandstücke (maximal 5  $\mu$ Sv/h an der Oberfläche) und die Beförderung eines Versandstücks unter ausschließlicher Verwendung (maximal 10 mSv/h an der Oberfläche). Die Versandstücke müssen zusätzlich so ausgelegt sein, dass die in Tab. 3.1 angegebenen Anforderungen an die Umschließung und die Abschirmung auch nach den für die einzelnen Versandstücktypen unterstellten Belastungen eingehalten werden.

Radioaktive Stoffe in besonderer Form mit einer Aktivität, die größer ist als  $A_1$  oder alle anderen radioaktiven Stoffe mit einer Aktivität, die größer ist als  $A_2$  müssen in Versandstücken befördert werden, deren Widerstandsfähigkeit unter Unfall-Beförderungsbedingungen nachgewiesen ist. Diesen Anforderungen entsprechen die Versandstücktypen B(U), B(M) oder C. Ein Typ C Versandstück ist erforderlich, wenn radioaktive Stoffe als Luftfracht befördert werden, deren Aktivität

- bei radioaktiven Stoffen in besonderer Form  $3000 A_1$  oder  $100\,000 A_2$  (je nachdem, welcher Wert niedriger ist) bzw.
- $3000 A_2$  (bei allen anderen radioaktiven Stoffen)

überschreitet.

**Tab. 3.1** Anforderungen an Versandstücke /POP 13/

Versandstücktyp	Prüfungen	Auslegung des Versandstücks		Paragraph in SSR-6
		Umschließung	Abschirmung	
Freigestellt	nicht definiert	nicht definiert	nicht definiert	622
IP-1	nicht definiert	nicht definiert	nicht definiert	623
IP-2	Fallprüfung und Stapeldruckprüfung (für normale Beförderungsbedingungen)	kein Verlust oder Verstreuung des rad. Inhalts	Nicht mehr als 20 %iger Anstieg der höchsten DL an der Oberfläche	623, 722, 723
IP-3	Alle Prüfungen für normale Beförderungsbedingungen <sup>1</sup>			624, 648, 719-724
Typ A				635, 648, 719-724
Typ B(U) und Typ B(M)	Alle Prüfungen für normale Beförderungsbedingungen	Max. Verlust des rad. Inhalts von $10^{-6} A_2/h$	Nicht mehr als 20 %iger Anstieg der höchsten DL an der Oberfläche	652, 659, 719-724
	Alle Prüfungen für Unfall-Beförderungsbedingungen	Max. Verlust des rad. Inhalts von	DL $\leq 10$ mSv/h in 1 m Abstand	659, 726-729

<sup>1</sup> Zusätzliche Prüfungen für Typ A Versandstücke für Flüssigkeiten und Gase:

- Fall des Prüfmusters aus 9 m Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament
- Senkrechter Fall einer Stange von 3,2 cm Durchmesser mit einem halbkugelförmigen Ende und einer Masse von 6 kg aus einer Höhe von 1,7 m auf das Prüfmuster

		A <sub>2</sub> /Woche (bzw. 10 A <sub>2</sub> für Krypton-85)	von der Oberfläche	
Typ C	Alle Prüfungen für normale Beförderungsbedingungen	Max. Verlust des rad. Inhalts von 10 <sup>-6</sup> A <sub>2</sub> /h	Nicht spezifiziert	669, 671(a), 719-724
	Gesteigerte Prüfungen für Unfall-Beförderungsbedingungen	Max. Verlust des rad. Inhalts von A <sub>2</sub> /Woche (bzw. 10 A <sub>2</sub> für Krypton-85)	DL ≤ 10 mSv/h in 1 m Abstand von der Oberfläche	669, 671(b), 734-737





## **4 Auswertung verkehrsträgerspezifischer Studien**

### **4.1 Unfalldaten**

Für die Ermittlung der beim Unfallgeschehen auftretenden Belastungen sind ausführliche Informationen zum Unfallablauf und detaillierte Kenntnisse der Randbedingungen erforderlich. Derartige Daten sind nicht für alle Verkehrsträger im gleichen Umfang verfügbar.

In den öffentlich verfügbaren Statistiken zum Unfallgeschehen finden sich in der Regel Angaben zu der Häufigkeit bestimmter Unfallarten, die beispielsweise hinsichtlich Unfallbeteiligten, Unfallursachen oder Schadensumfang eingegrenzt werden. Diese Statistiken bieten zwar einen Ansatz, um die Häufigkeit von Unfällen, etwa in Bezug auf bestimmte Fahrzeugtypen, oder hinsichtlich spezifischer Unfallsituationen wie Brand, Absturz von einer Brücke, etc. zu untersuchen, sie sind jedoch nicht geeignet, um die bei Unfällen auf die Behälter einwirkenden Belastungen zu quantifizieren und mit den in den Prüfanforderungen festgelegten Belastungen zu vergleichen. Lediglich die Aufschlüsselung hinsichtlich des Schadensumfangs ermöglicht eine grobe Klassifizierung der beim Unfallgeschehen aufgetretenen Beanspruchungen, ist jedoch auch kritisch zu bewerten, da beispielsweise beim Straßenverkehr Personenschäden nicht ausschließlich durch entsprechend stark beschädigte PKW und LKW verursacht werden, sondern auch durch ungeschützte Verkehrsteilnehmer wie Radfahrer und Fußgänger bedingt sind. Zudem kann ein Unfall zwischen PKW und LKW gerade den Insassen des PKWs erheblichen Schaden zufügen, ohne dass für die Ladung des LKWs erhöhte Unfallbelastungen auftreten. Die Abgrenzung des Schadensausmaßes, das im Hinblick auf die Behälterauslegung als relevant anzusehen ist, lässt sich ohne detailliertere Kenntnisse der beim Unfallablauf vorherrschenden physikalischen Parameter nur durch eine entsprechend konservative Betrachtungsweise sicherstellen.

Die für die Bewertung eines Unfallhergangs im Hinblick auf die Prüfanforderungen für Transportbehälter ausschlaggebenden Parameter werden in den amtlichen Statistiken nicht mit ausreichender Genauigkeit erfasst. So liegt beispielsweise der Fokus bei den öffentlich verfügbaren Statistiken zum Verkehrsunfallgeschehen im Straßenverkehr in der Erfassung der Zahl verletzter bzw. getöteter Personen in verschiedenen Unfallsituationen und der rechtzeitigen Erkennung tendenzieller Entwicklungen. Derartige Schadensbetrachtungen sind jedoch unzureichend, um den Abdeckungsgrad der IAEO-

Prüfanforderungen für unterschiedliche Unfallsituationen zu bewerten. Für die Abschätzung von Unfallhäufigkeiten und somit für die Bewertung des Unfallrisikos sind die öffentlich verfügbaren Unfallstatistiken allerdings unverzichtbar, da in ihnen sowohl eine ausreichende Datenbasis berücksichtigt wird, um Unfallhäufigkeiten zu bewerten, als auch Angaben zu den zurückgelegten Fahrleistungen – etwa für bestimmte Fahrzeugtypen, Verkehrswege bzw. Verkehrsträger – vorliegen, so dass die Ermittlung eines Unfallrisikos erfolgen kann.

Zu Flug- und Schiffsunfällen existieren Untersuchungen der IAEO /IAEA 01/, /IAEA 06/ die anhand von internationalen Datenbanken zum Schiffsverkehr und durch die Auswertung von Flugzeugunfällen die auftretenden Belastungen in Unfallsituationen untersucht haben. Die statistischen Daten, anhand derer die Untersuchungen erfolgen, beziehen sich in der Regel auf alle Schiffs- bzw. Flugzeugtypen, die grundsätzlich geeignet sind, um einen Transport durchzuführen.

Zu Unfällen in Zusammenhang mit dem Verkehrsträger Schiene existieren ältere Transportsicherheitsanalysen, wie beispielsweise *das Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung /PSE 85/* oder die Transportstudien Konrad (TSK 1991 /GRS 91/ und TSK 2009 /GRS 10/). Die in den Transportstudien Konrad verwendeten Unfallstatistiken umfassen für den Verkehrsträger Schiene teilweise weiter zurückliegende Zeiträume (ab 1979), reichen allerdings nur bis 2001. Eine Aktualisierung dieser Datengrundlage für zukünftige Aussagen zu erwarteten Unfallhäufigkeiten ist jedoch unter anderem aufgrund der Veränderungen im heutigen Verkehrsaufkommen erforderlich. Hierzu wurden Daten zu Bahnbetriebsunfällen vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) angefordert, diese standen jedoch erst nach Auslaufen dieses Arbeitspunktes zur Verfügung. Die statistische Aufbereitung und Auswertung dieser Daten konnte daher im Rahmen dieses Vorhabens aufgrund des größeren Arbeitsumfangs leider nicht mehr erfolgen.

## 4.2 Luft

1996 hat die IAEA die Spezifikationen für ein neues Typ C Versandstück für den Lufttransport radioaktiver Stoffe definiert. Dieser Transportbehälter soll für den Lufttransport radioaktiver Stoffe mit einer Aktivität von mehr als 3.000 A<sub>1</sub> oder 100.000 A<sub>2</sub> (je nachdem welcher Wert niedriger ist) für radioaktive Stoffe in besonderer Form bzw. 3.000 A<sub>2</sub> für alle anderen radioaktiven Stoffe verwendet werden (vgl. auch Kapitel 2 und 3).

Im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* wurden Untersuchungen zur Häufigkeit und Unfallschwere von Flugunfällen durchgeführt. Im Fokus stand dabei die Frage, inwiefern die Prüfanforderungen für ein Typ C Versandstück als abdeckend für potenzielle Flugunfälle angesehen werden können. Neuere Erkenntnisse mit einem größeren Detaillierungsgrad konnten nicht identifiziert werden, daher findet sich nachfolgend eine Auswertung dieser Studie.

### **Vergleich: Flugdatenschreiber – Typ C Behälter**

Ein erster Ansatz im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* war ein Vergleich der Testanforderungen von Flugdatenschreibern und Typ C Versandstücken. Flugdatenschreiber wurden als Vergleich herangezogen, da sie sehr häufig verwendet werden und nur sehr wenige nach Abstürzen ernsthafte Schäden erleiden. Vergleichstests im Hinblick auf mechanische Belastungen wurden durch *Bosik Consultants Limited* (BCL) im Auftrag von der *Canadian Nuclear Safety Commission* (CNSC) durchgeführt. Hier wurden Flugdatenschreiber den vorgeschriebenen mechanischen Tests für Typ C Behälter ausgesetzt und – da kein Typ C Behälter verfügbar war – ein Typ B Behälter den Testanforderungen für Flugdatenschreiber unterzogen. Das Ergebnis dieser Tests war, dass Flugdatenschreiber die mechanischen Tests für Typ C Behälter wahrscheinlich nicht überstehen, während Typ C Behälter den Testanforderungen an Flugdatenschreiber wahrscheinlich standhalten. Erwähnenswert ist jedoch, dass für die Tests nur ein einzelner Typ B Behälter (F-112/F-256) verwendet wurde. Da sich aber verschiedene Typ C Behälter in Größe, Masse und Steifigkeit deutlich unterscheiden, können die Testergebnisse nicht auf alle Arten von Typ C Versandstücken verallgemeinert werden. Außerdem wurden im Rahmen der beschriebenen Studie ausschließlich mechanische Tests durchgeführt und keine Brand- oder Wassertauchprüfungen vorgenommen.

## **Selektion der Unfalldaten**

Für die statistischen Analysen des *CRP /IAEA 06/* wurde eine Selektion von Daten zu Flugzeugunfällen vorgenommen. Im Hinblick auf mechanische Belastungen wurden dabei Daten über Flugzeugunglücke in den Jahren 1990 bis 2000 ausgewertet, an denen Flugzeuge mit einem maximal zulässigen Fluggewicht zwischen 27.001 und 272.000 kg, bzw. oberhalb von 272.000 kg (ICAO<sup>2</sup> Kategorien 4 bzw. 5) beteiligt waren. Außerdem wurden nur Unfälle betrachtet, die zu einer Zerstörung des Flugzeugs führten. Nach diesen Einschränkungen stand eine Datenbasis von 336 Unfällen (338 Flugzeuge waren beteiligt) zur Verfügung. Zur genaueren Analyse von den schwersten Unglücken wurden Unfälle ausgewählt bei denen Aufprallgeschwindigkeiten von mehr als 60 m/s auftraten. Durch diese weitere Einschränkung reduzierte sich die Datenbasis auf 135 Unfälle. Für die Auswertungen von Flugzeugunglücken in Zusammenhang mit Bränden und Untertauchen wurden alle Unfälle betrachtet, die sich nach dem Jahr 1990 ereignet haben. Des Weiteren wurden Fragebögen über die erwähnten 135 Unfälle und 86 weitere Unfälle entwickelt, um zusätzliche Informationen zu erhalten. Hierbei bezog sich einer der Fragebögen auf mechanische Belastungen und ein weiterer auf Brandeinwirkungen und Untertauchen.

## **Analyse der mechanischen Belastungen**

Die Rückgabe der Fragebögen resultierte in Daten über 53 Unfälle und nutzbare Daten über Aufprallgeschwindigkeiten von 39 Unfällen. Eine erste Auswertung dieser Unfälle ergab eine Wahrscheinlichkeit für Unfälle mit höheren Geschwindigkeiten als 90 m/s von 19 %. Bei dieser Auswertung wurden jedoch Abstürze unter verschiedenen Winkeln und auf unterschiedliche Oberflächen betrachtet.

Um dies zu korrigieren wurden die Aufprallgeschwindigkeiten für jeden Unfall in sogenannte „Äquivalentgeschwindigkeiten“ umgerechnet. Dies sind Geschwindigkeiten, die die Unfallbelastungen auf Geschwindigkeiten senkrecht zu einem unnachgiebigen Fundament normalisieren. Für zehn von den eben erwähnten 39 Unfällen wurde jedoch kein Aufprallwinkel angegeben. Deshalb wurde für diese Unfälle (konservativ) keine Winkel-Umrechnung vorgenommen.

---

<sup>2</sup> International Civil Aviation Organization

Die Auswertung der Fragebögen kommt für die beste Abschätzung der Umrechnungsfaktoren zu dem Ergebnis, dass eine Wahrscheinlichkeit von 5 % besteht, dass bei einem Unfall Aufprallgeschwindigkeiten von mehr als 90 m/s auftreten. Da dieser Wert durch die Umrechnung der Geschwindigkeit einen großen Fehler aufweist, wird die Äquivalentgeschwindigkeit zusätzlich konservativ mit dem 90. Perzentil der Umrechnungsfaktoren berechnet. Für diesen Fall ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 22 %, dass bei einem Unfall Aufprallgeschwindigkeiten von mehr als 90 m/s auftreten. Die hier dargestellte Auswertung hat jedoch den Nachteil, dass nur Unfälle ausgewertet wurden, für die auch Fragebögen ausgefüllt wurden. Das bedeutet, dass aufgrund der geringen Datenbasis auch die statistische Signifikanz gering ist.

Unter der Annahme, dass kein Zusammenhang zwischen der Aufprallenergie und der Tatsache besteht, dass die Fragebögen ausgefüllt wurden, konnte die Auswertung auf einen größeren Datensatz von 338 Ereignissen erweitert werden. In diesem Datensatz sind, wie oben erwähnt, alle Unfälle von Flugzeugen mit einer Masse von mehr als 27.000 kg enthalten, die sich zwischen 1990 und 2000 ereigneten und zu einer Zerstörung des Flugzeugs führten. Diese Auswertung kommt zu dem Ergebnis, dass eine Wahrscheinlichkeit von 2 % (beste Abschätzung der Umrechnungsfaktoren) bzw. 9 % (90. Perzentil der Umrechnungsfaktoren) besteht, dass bei einem Unfall Aufprallgeschwindigkeiten von mehr als 90 m/s auftreten.

Eine alternative Methode die Äquivalentgeschwindigkeiten zu berechnen ist die Einführung eines mittleren Oberflächenkorrekturfaktors für alle Unfälle. Dieser Ansatz ergibt für die Auswertung der 53 Unfälle mit Fragebogen eine Wahrscheinlichkeit von 20 %, dass bei einem Unfall Aufprallgeschwindigkeiten von mehr als 90 m/s auftreten. Die oben erwähnte Erweiterung auf den größeren Datensatz resultiert in einer Wahrscheinlichkeit von 8 %.

Zusammenfassend ergeben die verschiedenen Analysen also Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Äquivalentgeschwindigkeiten von mehr als 90 m/s bei einem Unfall im Bereich von 2 % bis 20 %.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde eine statistische Analyse durchgeführt. Die alleinige Berücksichtigung der Unfälle für die Fragebögen vorlagen ergibt eine Wahrscheinlichkeit für einen Unfall mit einer Aufprallgeschwindigkeit von mehr als 90 m/s im Bereich von 11 % bis 25 % mit einem Confidence Level von 90 % bzw. im Bereich von 15 % bis 20 % mit einem Confidence Level von 2/3. Die oben erwähnte Erweiterung

auf den größeren Datensatz von 338 Ereignissen ergibt eine Wahrscheinlichkeit für einen Unfall mit einer Aufprallgeschwindigkeit von mehr als 90 m/s im Bereich von 8 % bis 18 % mit einem Confidence Level von 90 % bzw. im Bereich von 10 % bis 14 % mit einem Confidence Level von 2/3.

Eine beobachtete Einschränkung in der Datenbasis ist die geringe Anzahl von Ereignissen in der Landephase des Flugzeugs. Da in dieser Phase jedoch typischerweise niedrige Geschwindigkeiten auftreten sollten die erzielten Ergebnisse einer konservativen Abschätzung entsprechen. Die geringe Datenbasis ist auch insgesamt für die dargestellte Analyse eine große Schwierigkeit. Daher erklären sich auch die genannten Variationen bzw. die großen Unsicherheiten in den Ergebnissen.

### **Analyse der thermischen Belastungen**

Des Weiteren wurden im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* Feuer innerhalb des Flugzeuges und Feuer, die durch einen Unfall zustande kamen betrachtet. Feuer innerhalb eines Flugzeugs sind in der Regel relativ kurz, da sie entweder zu einer Notlandung oder zu einem Aufprall führen. Das Auslaufen oder die Verteilung des Treibstoffs führt im Normalfall auch zu dessen Entzündung, wobei die Temperaturen in großen Treibstofffeuern typischerweise die in den IAEO-Regularien berücksichtigten 800 °C überschreiten. Deshalb haben diese Feuer eine große Relevanz, obwohl sie normalerweise relativ kurz im Vergleich zu Feuern sind, die beispielsweise durch Entzündung der Ladung zustande kommen.

Beim Aufprall eines Flugzeugs mit hoher Geschwindigkeit treten Wolken aus Treibstoffnebel auf. Experimente haben gezeigt, dass bei Aufprallgeschwindigkeiten von etwa 60 m/s meist keine Lachenbildung auftritt und bei 90 m/s weniger als 50 % des Treibstoffs als flacher Film auf der Oberfläche auftritt /TIE 95/. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Wert noch geringer ist ist hoch, falls eine Entzündung des gebildeten Treibstoffnebels auftritt. Die Ausbreitung eines Feuers in Treibstoffwolken (Feuerball) hat eine Dauer von nur wenigen Sekunden und geschieht damit deutlich schneller als in einer Kerosinlache.

Experimente haben gezeigt, dass große Kerosin-Feuerbälle Temperaturen von bis zu 1300 °C erreichen /DOR 95/. Durch die kurze Dauer des Feuers ist die Auswirkung auf Typ C Versandstücke aber vernachlässigbar. Jedoch können solche Feuer dazu führen, dass weitere Gegenstände entzündet werden, die deutlich längere Branddauern

aufweisen können. Nur bei niedrigen Aufprallgeschwindigkeiten kann es vorkommen, dass Löcher im Treibstofftank auftreten, die klein genug sind, um kleinflächige Feuer von langer Dauer zu unterhalten. Andererseits würden diese Feuer aber mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer weiteren Beschädigung des Tanks führen.

Der typische Brennstoffverbrauch für Kerosinfeuer liegt bei etwa 5 mm/min /SUO 01/. Dieser Wert ist abhängig vom Lachendurchmesser und der Windgeschwindigkeit. Das bedeutet, dass eine Lache von 5 cm Tiefe notwendig wäre, um ein Feuer mit einer Dauer von 10 min zu unterhalten. Experimente /SUO 01/ haben gezeigt, dass eine Temperatur von 1100 °C eine sinnvolle obere Abschätzung für mittlere Kerosinfeuer-Temperaturen bei großen Bränden ist. Außerdem kann gezeigt werden, dass die thermischen Auswirkungen eines vollumschließenden Feuers mit einer Temperatur von 1100 °C und einer Dauer von 10 min denen bei einer Temperatur von 800 °C und einer Dauer von 27 min entsprechen. Zusätzlich zu Kerosinfeuern können jedoch noch weitere Feuer auftreten, bei denen aber in der Regel niedrigere Temperaturen erreicht werden, so dass diese durch die in den IAEO-Anforderungen angegebenen Temperatur von 800 °C abgedeckt sein sollten.

Die im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* durchgeführte statistische Analyse der Feuer basiert auf der Auswertung von 53 Fragebögen. Dabei wurden die Feuer in Boden-Betrieb-Feuer, In-Flug-Feuer und Feuer die durch Abstürze verursacht wurden unterteilt. Von den 53 erwähnten Ereignissen gab es in 46 Fällen Informationen über aufgetretene Brände, wobei es in 43 Fällen (auch) zu einem durch einen Aufprall verursachten Feuer kam. Für 29 Ereignisse waren Informationen über die Branddauer verfügbar, wobei in zwei Fällen relativ lange Feuer mit einer Dauer von mehr als 24 h (bis zur Löschung) auftraten. Diese beiden Feuer wurden genauer untersucht, wobei sich herausstellte, dass in beiden Fällen große Sekundärfeuer (Vegetation bzw. Wohngebäude) auftraten. Da die thermischen Auswirkungen auf einen Typ C Behälter nur bei schweren Feuern bedeutsam sind wurden im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* Branddauern bis zu dem Zeitpunkt betrachtet, in dem das Feuer unter Kontrolle ist. Jedoch waren nur für zehn der ausgewerteten Ereignisse Informationen verfügbar, die es erlauben diese Zeit mit der Zeit bis zur Löschung des Feuers zu vergleichen.

Auf Grund der geringen Datenbasis war es im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* nicht möglich belastbare Ergebnisse über typische Branddauern bei Flugzeugunglücken zu erhalten. In den meisten Fällen mit langer Branddauer gibt es jedoch starke Hinweise, dass Sekundärfeuer involviert waren. In diesen Fällen vergrößert und bewegt sich die

Brandfläche im Allgemeinen, so dass die Wahrscheinlichkeit für vollumschließende Feuer während der gesamten Branddauer sehr unwahrscheinlich ist. Eine Feuertemperatur von 800 °C ist aufgrund der Ergebnisse im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* eine sinnvolle Annahme, solange kein Kerosinfeuer beteiligt ist. Für typische große Kerosinlachen kann man Feuertemperaturen von 1100 °C und Branddauern von 20 min erhalten, was hinsichtlich der thermischen Auswirkungen auf Versandstücke äquivalent zu einer Temperatur von 800 °C bei einer Branddauer von 1 h ist. Die Wahrscheinlichkeit für Brände in dieser Größenordnung ist sehr gering, ein genauer Wert hierfür kann jedoch aufgrund der geringen Datenbasis für die Untersuchungen nicht angegeben werden. Ein Absturz in Gebiete mit viel brennbarem Material, wie z. B. in Gebäude kann aber nicht völlig ausgeschlossen werden. Dies könnte zu Bränden führen, deren Auswirkungen auf die Typ C Versandstücke über die Anforderungen der IAEA hinausgehen.

### **Analyse der Druckbelastungen durch Untertauchen**

Die Auswertung von 64 Fragebögen im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* zeigte, dass acht von diesen Unfällen zu einem Untertauchen in Gewässer führten. Für zwei dieser Unfälle gab es keine Informationen über die Wassertiefe, bei drei Unfällen war die Eintauchtiefe größer als 100 m und bei drei Unfällen kleiner als 5 m. Bei fünf Ereignissen lagen Informationen über die Zeit zwischen dem Absturz und der Bergung des Flugdatenschreibers vor (sofort bis 10 Tage). Für zwei Ereignisse lagen Angaben über die Zeit zwischen dem Unfall und der Bergung der Fracht vor (13 Tage, 117 Tage).

Die Auswertung des gesamten oben beschriebenen Datensatzes von 336 Unfällen zeigte, dass 19 von diesen zu einem Untertauchen führten, was 5,6 % dieser Unfälle entspricht. Aufgrund der geringen Datenbasis ist es nicht möglich verlässliche Angaben über Aufprallgeschwindigkeiten oder typische Eintauchtiefen zu machen, es lassen sich jedoch allgemeine Aussagen treffen.

Bei Unfällen mit geringer Geschwindigkeit in flachem Wasser ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass das Versandstück geborgen wird ohne dass es zu erhöhten Dosen für die Bevölkerung kommt. Bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten ist es möglich, dass das Versandstück beschädigt wird und es somit zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt. Im Rahmen des *CRP /IAEA 01/* (vgl. auch Abschnitt 4.3) wird eine Studie des *Institute for Nuclear Safety and Protection* und des *Nuclear Protection Evaluation Centre* (IPSN-CEPN) beschrieben, die die Auswirkungen der Freisetzung von 1 kg PuO<sub>2</sub>



Pulver in Folge eines Schiffunglücks im Ärmelkanal abschätzt. Diese Studie berechnet eine maximale Dosis für die IAE0-Referenzperson von  $8 \cdot 10^{-3}$  mSv im ersten Jahr nach dem Unfall.

Bei Eintauchtiefen über 200 m kann es vorkommen, dass es unmöglich ist, das Versandstück zu bergen. Die Konsequenzen daraus werden für unterschiedliche Szenarien in den im Rahmen des *CRP /IAEA 01/* (vgl. auch Abschnitt 4.3) beschriebenen Studien des *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI) und der *Sandia National Laboratories* (SNL) berechnet. Die CRIEPI-Studie berechnet eine Dosis für die maximal exponierte Person von  $2,3 \cdot 10^{-3}$  mSv/a, die SNL-Studie ermittelt eine mittlere Personendosis von maximal  $1,8$  mSv/a<sup>3</sup>.

Zusammenfassend kommen die Untersuchungen im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* zu dem Schluss, dass ein Unfall in Verbindung mit einem Eintauchen des Versandstücks, der mit signifikant erhöhten Personendosiswerten verbunden ist sehr unwahrscheinlich ist.

### **Analyse von Unfallhäufigkeiten**

Die im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* durchgeführte Analyse der Unfallhäufigkeiten basiert auf Daten von Airclaim (UK). Es zeigen sich Variationen in der Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der geographischen Lage, dem Zweck des Flugs und der Flugzeuggröße.

Die gemittelte weltweite Unfallhäufigkeit mit Totalschaden liegt für Flugzeuge mit einer Masse von mehr als 25.000 kg in den Jahren 1990 bis 2000 bei 0,64 je 1 Mio. Flüge. Für Frachtflüge ist diese Unfallrate etwa dreimal so hoch (1,93 je 1 Mio. Flüge).

Über diese Analyse hinaus wurden Daten der ICAO über Unfälle von 1995 bis 2004 ausgewertet. Als Maß für die Schwere der Unfälle wird von der ICAO die Anzahl der schweren Verletzungen herangezogen. Dies hat jedoch nur begrenzte Aussagekraft, da hier auch Unfälle mit einfließen, die nicht zur Zerstörung des Flugzeugs führen. Das Ergebnis der Auswertungen ist, dass die Gesamtanzahl der Unfälle im Laufe der Jahre

---

<sup>3</sup> Im Text des *CRP /IAEA 06/* wird, wie auch im Text des *CRP /IAEA 01/* (vgl. Abschnitt 4.3), ein Wert von 18 mSv/a genannt. Jedoch wird im entsprechenden Originalzitat (vgl. /AMM 98a/) ein Wert von 0,18 rem, also 1,8 mSv angegeben.

sinkt, obwohl die Anzahl der Flüge steigt. Dieser Trend ist jedoch hauptsächlich für Passagierflüge signifikant, während die Anzahl der Unfälle bei Frachtflügen in etwa konstant bleibt.

### **Abschätzung des Transportrisikos**

Die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für Unfälle mit möglichen Schäden für Typ C Versandstücke kommt zu dem Ergebnis, dass die Unfallhäufigkeit im Luftverkehr, bei einem angenommenen Transportvolumen von 1000 Versandstücken im Jahr, bei etwa einem Unglück in 1250 Jahren liegt. Für ein realistischeres Transportvolumen von 100 Versandstücken im Jahr ergibt sich also eine Unfallhäufigkeit von einem Unglück in 12.500 Jahren. Die Wahrscheinlichkeit für ein Flugzeugunglück, das mit einem Aufprall bei Geschwindigkeiten von mehr als 90 m/s verbunden ist, liegt bei  $1,3 \cdot 10^{-7}$ . Das bedeutet, dass ein Versandstück bei einem von etwa 8 Mio. Flügen einem ernststen Unfall unterliegt.

### **Bewertung der Studie**

Die Analyse im Rahmen des *CRP /IAEA 06/* kommt zu dem Schluss, dass die gegenwärtigen Anforderungen an Typ C Versandstücke angemessen sind, jedoch beziehen sich die statistischen Auswertungen in der Regel auf wenige Einzelfälle zu denen überhaupt Daten vorliegen. Beispielsweise wurde für die Experimente zum Vergleich der Anforderungen von Flugdatenschreibern und Typ C Versandstücken nur ein bestimmtes Typ B Versandstück verwendet. Außerdem wurden in diesen Experimenten ausschließlich die mechanischen Anforderungen verglichen, während Brand- und Wassertauchprüfungen außen vor gelassen wurden. Des Weiteren war es insbesondere bei der Auswertung der Unfälle in Zusammenhang mit thermischen Belastungen und Untertauchen aufgrund der geringen Datenbasis nicht möglich, aussagekräftige statistische Analysen durchzuführen. Aus diesem Grund muss die in der Studie angegebene Bewertung der Angemessenheit der Testanforderungen, insbesondere in Bezug auf die Wassertauchprüfungen, infrage gestellt werden. Andererseits resultiert die geringe statistische Signifikanz auf sehr geringen Wahrscheinlichkeiten für Flugzeugunglücke, was die hohe Sicherheit im Flugverkehr unterstreicht.

### 4.3 See

Aufgrund von Bedenken der Bevölkerung gegen den Schiffstransport radioaktiver Stoffe und empfohlen von der SAGSTRAM<sup>4</sup> wurde Anfang der 1990er Jahre eine gemeinsame Arbeitsgruppe der IAEA und der IMO<sup>5</sup> gegründet, der sich später auch Vertreter des UNEP<sup>6</sup> anschloss. Das Ergebnis dieser Arbeitsgruppe war, dass der Schiffstransport ein geringes radiologisches Risiko aufweist aber auch, dass im Falle neuer Erkenntnisse über Unfälle, die nicht durch die IAEA-Anforderungen an Typ B Versandstücke abgedeckt werden, diese Anforderungen überarbeitet werden müssen.

1993 hat die IMO internationale Standards für Schiffe eingeführt, die radioaktive Stoffe transportieren, den INF Code<sup>7</sup>. Dieser wurde 2001 durch die Aufnahme in das *Internationale Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS<sup>8</sup>)* verpflichtend für alle Mitgliedsstaaten der IMO.

1993 empfahl das SAGSTRAM ein *Co-ordinated Research Project (CRP)* zu beginnen, um die IAEA/IMO/UNEP Arbeitsgruppe zu unterstützen. Die durchgeführten Studien führten zu elf Berichten (/AMM 98a/, /KAY 93/, /KAY 95/, /LAN 98/, /SCH 99/, /SEL 91/, /SEL 92a/, /SEL 92b/, /TSU 99/, /YAM 98a/, /YAM 98b/), die in dem TECDOC-1231 /IAEA 01/ zusammengefasst wurden. Das Dokument behandelt die Beförderung hochradioaktiven Abfalls in großen Typ B Behältern. Hierbei werden Unfallstatistiken ausgewertet, die im Wesentlichen aus Daten der Lloyd-Datenbank und der MAIB<sup>9</sup> aus dem UK stammen und auch radiologische Auswirkungen von Unfällen untersucht. Neuere Erkenntnisse mit diesem erforderlichen Detaillierungsgrad konnten nicht identifiziert werden, daher findet sich nachfolgend eine Auswertung dieser Studie.

---

<sup>4</sup> Standing Advisory Group of the Safe Transport of Radioactive Materials

<sup>5</sup> International Maritime Organization

<sup>6</sup> United Nations Environment Programme

<sup>7</sup> Code for Safe Carriage of Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes in Flasks on Board Ships

<sup>8</sup> International Convention for the Safety of Life at Sea

<sup>9</sup> Marine Accident Investigation Branch

## Vorschriften für den Schiffstransport radioaktiver Stoffe

Für die Gewährleistung eines internationalen Standards sind die Richtlinien der IAEO und der IMO maßgeblich. Im von der IMO festgelegten IMDG Code<sup>10</sup> sind wesentliche Aspekte für die Beförderung gefährlicher Güter auf See wie Beförderungspapiere, Kennzeichnungen, Lagerung und Handhabung beschrieben.

Neben den internationalen Richtlinien für den Transport radioaktiver Stoffe sind die nationalen Gesetze und Richtlinien des Herkunftslandes, des Landes für das die Fracht bestimmt ist, sowie der Länder deren Häfen angefahren werden und die gesetzlichen Vorschriften des Landes unter dessen Fahne das Schiff fährt, zu beachten.

Die Anforderungen der IAEO und der IMDG Code enthalten keine Vorgaben, die sich auf die Konstruktion, die Ausstattung oder die Auslegung der Schiffe beziehen, die radioaktive Stoffe transportieren. Daher wurde der INF Code entwickelt, der internationale Anforderungen an Schiffe, die radioaktive Stoffe transportieren, etabliert.

Im INF Code werden drei verschiedene Klassen von Schiffen benannt, die durch das maximal für die Beförderung zulässige Aktivitätsinventar definiert sind. Die Anforderungen an die einzelnen Schiffsklassen steigen hierbei mit dem maximal transportierbaren Aktivitätsinventar. Für die drei INF Klassen gelten dabei folgende Aktivitätsbegrenzungen:

- INF 1:  $A_{\text{Ges}} < 4.000 \text{ TBq}$
- INF 2:  $A_{\text{Ges}} < 2.000.000 \text{ TBq}$  und  $A_{\text{Pu}} < 200.000 \text{ TBq}$
- INF 3: ohne Beschränkung der Aktivität

Für diese INF Klassen werden spezifische Anforderungen beispielsweise hinsichtlich der Schiffskonstruktion, Leckstabilität, Brandschutzmaßnahmen, Temperaturkontrolle der Laderäume, Ladungssicherung und Stromversorgung gestellt. Die für die Studie /IAEA 01/ verwendete Datenbasis bezieht hingegen sämtliche Schiffstypen mit ein, die grundsätzlich für einen Transport in Frage kämen. In den statistisch abgeleiteten Werten zur Häufigkeit von beispielsweise Brandereignissen sind diese zusätzlichen Anforderungen demnach nicht berücksichtigt.

---

<sup>10</sup> International Maritime Code for Dangerous Goods

## Analyse der mechanischen Belastungen

Die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung durch eine Schiffskollision kann in vier Einzelwahrscheinlichkeiten zerlegt werden:

- Wahrscheinlichkeit für eine Kollision
- Wahrscheinlichkeit, dass die Kollision in einer Konfiguration passiert in der das Versandstück Schaden nehmen kann
- Wahrscheinlichkeit, dass die Kollision schwer genug ist, dass die Auswirkungen auf die Position des Versandstücks durchbrechen oder dass die Ladung um das Versandstück zusammengepresst wird
- Wahrscheinlichkeit, dass die Kräfte, die auf das Versandstück wirken, groß genug sind, um ein Versagen des Versandstücks hervorzurufen.

Die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision liegt für eine Transportstrecke von 1000 Seemeilen bei etwa  $10^{-4}$  /IAEA 01/.

Lt. /IAEA 01/ verbieten es gesetzliche Vorschriften, Fracht im vorderen Teil des Schiffs zu transportieren. Das bedeutet, dass bei einer Kollision die Fracht des auffahrenden Schiffs nicht von der Kollision betroffen ist. Außerdem verursachen Kollisionen unter kleinen Aufprallwinkeln nur einen geringen Schaden im Bereich der Frachträume. Ein Schaden an einem Versandstück kann also nur dann auftreten, wenn die Kollision nahezu rechtwinklig passiert und das Schiff mit dem Versandstück das getroffene (nicht das treffende) ist. Die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision unter diesen beiden Bedingungen liegt bei ca. 0,1 /IAEA 01/.

Die Schwere einer Kollision ist abhängig von der Masse der beteiligten Schiffe und von deren Relativgeschwindigkeit. Reardon und Sprung /REA 96/ haben in ihren Analysen die Eindringtiefen für Schiffskollisionen untersucht. Die Analysen kamen zu dem Ergebnis, dass es bei etwa 15 % der Unfälle, die in der oben angegebenen Konfiguration passieren, zu Belastungen für das Versandstück kommen kann, wenn dieses in einem kleinen Frachtschiff ohne weitere Fracht befördert wird. Für die Beförderung in größeren Frachtschiffen, die durch Kollisionen weniger stark verschoben werden und bei denen sich das Versandstück mit weiterer Ladung im selben Laderaum befindet, liegt die Wahrscheinlichkeit bei etwa 30 %.

Die genannten Eintrittswahrscheinlichkeiten sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

**Tab. 4.1** Eintrittswahrscheinlichkeiten nach /IAEA 01/ für verschiedene Unfallereignisse (mechanische Belastungen)

Ereignis	Wahrscheinlichkeit		Wert
Eintritt einer Schiffskollision auf einer Transportstrecke von 1000 nmi <sup>11</sup>	P <sub>Kollision</sub>		~10 <sup>-4</sup>
Schiff mit RAM Behältern ist das gerammte Schiff	P <sub>RAM Schiff gerammt</sub>		0,5
Aufprall in der Mitte des Schiffes	P <sub>Aufprall Mitte</sub>		~0,33
RAM Behälter in der Mitte des Schiffes lokalisiert	P <sub>Behälter Mitte</sub>	Kleine Schiffe	1,0
		Große Schiffe	<1,0
Quetschbelastungen auf den Behälter	P <sub>Quetschbelastungen</sub>	Kleine Schiffe	~0,15
		Große Schiffe	~0,3

Den Ergebnissen in Tab. 4.1 liegen dabei sowohl Daten von Unfallereignissen als auch Simulationen zu Grunde. Die Gesamtwahrscheinlichkeit für eine Schiffskollision auf einer Transportstrecke von 1000 Seemeilen, die mit Belastungen für das Versandstück verbunden ist, kann mit diesen Daten berechnet werden und liegt im Bereich von 3·10<sup>-6</sup>. Jedoch sind hier weder die Anforderungen an Schiffe der Klasse INF 3 noch die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, dass die Kräfte, die auf das Versandstück wirken, groß genug sind, um ein Versagen des Versandstücks hervorzurufen.

Im Falle einer schweren Kollision gibt es zwei Möglichkeiten, in denen das Versandstück beschädigt werden kann: Zum einen kann es zu einem direkten Kontakt zwischen dem Schiffsrumpf des kollidierenden Schiffes und dem Versandstück kommen und zum anderen kann es zu Belastungen durch Kontakt des Versandstücks mit weiterer Fracht oder Schiffsstrukturen kommen. Im ersten Fall wird aufgrund der, im Vergleich zu den regulatorischen Anforderungen /IAEA 12/, deutlich niedrigeren Aufprallgeschwindigkeiten kein ernstzunehmender Schaden an dem Versandstück erwartet. Wenn weitere Fracht vorhanden ist, kann davon ausgegangen werden, dass es zunächst zu Beschädigungen dieser Fracht kommt, bevor Beschädigungen an dem, im

<sup>11</sup> Nautische Meile; 1 nmi = 1852 m

Normalfall weitaus belastbareren, Typ B Versandstück auftreten. Die von Ammerman und Ludwigsen durchgeführte Finite-Elemente-Analyse /AMM 98b/ kommt zu dem Ergebnis, dass die Kräfte, die bei kollisionsbedingten Quetschungen des Versandstücks an Schiffsstrukturen auftreten können, vergleichbar mit denen sind, denen Typ B Versandstücke auslegungsbedingt standhalten können müssen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Belastungen auf das Versandstück wirken, die über die regulatorischen Belastungsanforderungen hinausgehen, sehr gering ist. Das erwartete Resultat solch einer Schiffskollision wäre das Hinausdrücken des Versandstücks durch die Außenhülle des Transportschiffes, ohne dass ernsthafte Beschädigungen am Versandstück auftreten.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Belastungen bei Schiffskollisionen, die über diejenigen hinausgehen, die bei den gesetzlich vorgeschriebenen Belastungstests auftreten, sehr gering und insbesondere geringer als für den Transport an Land ist. Der Abdeckungsgrad der für die Typ B Versandstücke vorgeschriebenen Belastungstests ist somit für den Seetransport, wie für den Transport an Land, ausreichend.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Transportstrecke von 1000 Seemeilen eine Kollision passiert, die zwar nicht zu einer ernsthaften Beschädigung des Versandstücks durch die auftretenden mechanischen Belastungen, jedoch zum Untergang des getroffenen Schiffs und damit des Versandstücks führt, liegt bei ca.  $4 \cdot 10^{-7}$ .

### **Analyse der thermischen Belastungen**

Im Rahmen des CRP /IAEA 01/ wurde des Weiteren die Wahrscheinlichkeit für einen Brand auf einem Frachtschiff mit dem Ergebnis bestimmt, dass diese Wahrscheinlichkeit für eine Transportstrecke von 1000 Seemeilen bei etwa  $3 \cdot 10^{-4}$  liegt.

Durch die hohen Belastungsanforderungen an Typ B Versandstücke treten ernste Beschädigungen jedoch nur bei außergewöhnlich schweren Bränden auf. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis über die Schwere von Schiffsbränden wurde mit Hilfe von Experimenten und deren Modellierung eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für einen Brand durchgeführt, der zu einer Beschädigung des Versandstücks führen kann.

Die Analyse der durchgeführten Experimente hat gezeigt, dass bei nichtumschließenden Bränden die Hitzebelastungen auf das Versandstück geringer sind als bei den ge-

setzunglich vorgeschriebenen Belastungs-Tests für Typ B Versandstücke. Die Modellierung von Brandausbreitungen innerhalb eines Schiffes hat gezeigt, dass innerhalb eines Schiffes Brände auftreten können, die lange und mit sehr hoher Temperatur brennen, auch wenn die Wahrscheinlichkeit hierfür gering ist. Die Wahrscheinlichkeit für eine Ausbreitung eines Brandes, der an einer zufälligen Position im Schiff beginnt, zu der Position des Versandstücks wurde unter der Annahme berechnet, dass diese Ausbreitung weder durch Sauerstoffmangel, noch durch Brandbekämpfung behindert wird. Diese Abschätzung wurde unter der Verwendung einer konservativen Annahme für die Wahrscheinlichkeit durchgeführt, dass das Schiff ausreichend brennbares Material enthält. Die Abschätzung kam zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Feuer, das lange und heiß genug brennt, um eine Beschädigung des Versandstücks zu verursachen, bei etwa  $10^{-3}$  liegt. Dementsprechend liegt diese Wahrscheinlichkeit bei der Verwendung eines Spezialschiffes (INF 3), das keine brennbare Ladung befördert und redundante Brandbekämpfungs-Systeme besitzt, bei weniger als  $10^{-4}$ . Dieser Wert ist vergleichbar mit einer weitaus genaueren Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von  $10^{-5}$  für den Fall, dass sich ein Brand, der im Maschinenraum des Schiffes beginnt, bis in den Laderaum ausbreitet, in dem sich das Versandstück befindet.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Transportstrecke von 1000 Seemeilen ein Schiffsbrand auftritt, der zu einer ernsthaften Beschädigung des Versandstücks führt, liegt also im Bereich von ca.  $4 \cdot 10^{-9}$  bis  $4 \cdot 10^{-7}$ .

### **Radiologische Auswirkungen**

Zur Ermittlung der radiologischen Auswirkungen hypothetischer Schiffsunfälle wurden verschiedene Studien durchgeführt (SNL /AMM 98a/, IPSN-CEPN /LEI 98/, CRIEPI /TSU 99/). Diese Studien unterscheiden sich in der Wahl der Unfallorte, der Versandstückinhalte, der Freisetzungsszenarien und der Analysemethoden und sind somit nicht direkt miteinander vergleichbar.

Die Studie der *Sandia National Laboratories* (SNL) ist die einzige der beschriebenen Studien, die neben einer Freisetzung in den Ozean auch eine Freisetzung in die Atmosphäre betrachtet. Das betrachtete Szenario für eine atmosphärische Freisetzung, das die höchsten Dosen verursacht, ist eine Kollision, die zu zwei Löchern im Versandstück führt und zusätzlich einen Brand verursacht, der sehr heiß brennt und das Versandstück umschließt. Die Wahrscheinlichkeit für solch einen Unfall liegt bei etwa  $4 \cdot 10^{-14}$  bei einer Wegstrecke von 1000 Seemeilen. Für dieses Szenario werden über 50



Jahre gemittelte mittlere Personendosen von 0,5 mSv/a für einen Unfall in einem Hafen bzw. 0,2 mSv/a für einen Unfall in Küstennähe angegeben. Für die Freisetzung in den Ozean ergeben sich die größten radiologischen Auswirkungen bei einem Eintauchen des Versandstücks in ein Fischereigebiet der Neufundlandbank und eine dortige Freisetzung des radioaktiven Inventars über einen Zeitraum von drei Jahren. Hierfür ergibt sich eine maximale mittlere Personendosis von 1,8 mSv/a<sup>12</sup> etwa fünf Jahre nach dem Unfall.

Die Studie des *Institute for Nuclear Safety and Protection* und des *Nuclear Protection Evaluation Centre* (IPSN-CEPN) betrachtet eine Freisetzung in den westlichen Ärmelkanal. Für eine IAEA Referenz-Person ergibt sich, unter der Annahme, dass sämtliche konsumierten Fische und Meeresfrüchte kontaminiert sind, eine Personendosis im ersten Jahr nach dem Unfall von  $8 \cdot 10^{-3}$  mSv. Für einen durchschnittlichen Europäer, der etwa 17 mal weniger Fisch und Meeresfrüchte konsumiert als die IAEA Referenzperson die zusätzlich nicht alle aus der gleichen Region stammen, ergibt sich im ersten Jahr nach dem Unfall eine Personendosis von  $5 \cdot 10^{-5}$  mSv.

Die Studie des *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI) behandelt die radiologischen Auswirkungen durch ein Untertauchen eines Versandstücks in den tiefen (2500 m) Ozean und in Küstengewässer (200 m). Für eine Freisetzung in der Tiefsee ergibt sich, unter der Annahme, dass sämtlicher konsumierter Fisch und sämtliche konsumierten Meeresfrüchte kontaminiert sind, eine Personendosis von  $4,7 \cdot 10^{-9}$  mSv/a. Für eine Freisetzung in Küstengewässern beträgt diese Dosis  $2,3 \cdot 10^{-3}$  mSv/a.

## **Zusammenfassung der Ergebnisse und Bewertung der Studie**

Die wichtigsten Schlussfolgerungen des CRP /IAEA 01/ sind:

- Schiffskollisionen sind abhängig von der Schiff-Verkehrsdichte und damit vor allem von der Region des Ozeans abhängig, in denen das Schiff fährt. Die Verkehrsdichte hat keinen Einfluss auf die Häufigkeit von Bränden auf einem Schiff. Allerdings steigt die Wahrscheinlichkeit für ein Feuer während einer Reise direkt mit der zurückgelegten Distanz bzw. der Fahrzeit.

---

<sup>12</sup> Im Text des CRP /IAEA 01/ wird ein Wert von 18 mSv/a genannt. Jedoch wird im entsprechenden Originaltext (vgl. /AMM 98a/) ein Wert von 0,18 rem, also 1,8 mSv angegeben.

- Schiffskollisionen und Feuer an Bord eines Schiffes sind seltene Ereignisse; die meisten Schiffskollisionen und Feuer an Bord eines Schiffes werden an einem Versandstück nicht zu mechanischen oder thermischen Belastungen führen. Die Wahrscheinlichkeit, dass durch eine Schiffskollision oder ein Feuer an Bord des Schiffes ein Versandstück Belastungen ausgesetzt wird, die zu einem Versagen des Versandstücks führen, ist sehr klein.
- Wenn eine Schiffskollision zu einer Krafteinwirkung auf einen Transportbehälter führt, wird die Größe dieser Kräfte geringer oder höchstens vergleichbar mit den Kräften sein, denen der Behälter während der mechanischen Belastungsprüfungen zur gesetzlichen Zertifizierung ausgesetzt war.
- Es ist unwahrscheinlich, dass Schiffskollisionen zu einer Beschädigung des Transportbehälters führen, da die Aufprallkräfte hauptsächlich zu Deformationen von Schiffsstrukturen und nicht zu Deformationen am Behälter beitragen.
- Es ist unwahrscheinlich, dass Schiffsbrände im Laderaum des Versandstücks beginnen. Wenn ein Feuer an einer anderen Stelle auf dem Schiff ausbricht, ist eine Ausbreitung auf diesen Laderaum ebenfalls nicht wahrscheinlich. Selbst wenn ein Feuer sich bis zu dem Versandstück ausbreitet, wird der fehlende Brennstoff bzw. die fehlende Luft in der Regel verhindern, dass das Feuer heiß genug bzw. lange genug im Laderaum brennt, um die Freisetzung von radioaktivem Material aus einem Behälter zu verursachen und im Falle eines beschädigten Behälters in Folge einer vorherigen Kollision, eine deutliche Zunahme der Freisetzung aus dem Behälter verhindern.
- Es ist unwahrscheinlich, dass Wärmeströme von kleinen Bränden, die den Laderaum des Versandstücks nicht umschließen, den Wärmestrom überschreiten, der für die Zertifizierung des Behälters bei den Brandtests herangezogen wurde.
- Das meiste radioaktive Material, das als Folge eines Unfalls in das Innere eines Behälters freigesetzt wird, lagert sich an Oberflächen im Inneren des Behälters ab. Daher ist der Rückhaltefaktor des Behälters groß und der Freisetzunganteil vom Behälter in die Umwelt klein.
- Sollte die Kollision eines Schiffes bzw. der Brand an Bord eines Schiffes zum Sinken eines Transportschiffes und damit zum Verlust eines Versandstücks in den Ozean führen, ist die Rückholung des Versandstücks wahrscheinlich, wenn der Verlust auf dem Kontinentalschelf stattfindet. Wird der Behälter nicht geborgen, erfolgt

die Freisetzung von radioaktivem Material aus dem Behälter ins Meerwasser derart langsam, dass die Strahlenexpositionen, denen Menschen ausgesetzt werden, die kontaminierten Fisch oder kontaminierte Meeresfrüchte konsumieren, als vernachlässigbar gegenüber der Hintergrundstrahlung anzusehen sind.

- Wenn ein Transportschiff, während es im Hafen liegt oder sich in Küstennähe befindet, in eine schwere Kollision verwickelt ist, die einen ernstzunehmenden Brand auslöst, wird die größte Menge an radioaktivem Material, das möglicherweise in Folge des Unfalls in die Atmosphäre freigesetzt werden würde, individuelle Strahlenexpositionen auslösen, die weit unterhalb der Hintergrundstrahlung liegen.

Das bedeutet, da die Wahrscheinlichkeiten für schwere Schiffsbrände und schwere Kollisionen klein sind und auch die radiologischen Konsequenzen durch solch ein Unglück sehr klein wären, ist das Risiko für den Schiffstransport in Typ B Behältern sehr gering.

In den im Rahmen des *CRP /IAEA 01/* dargestellten Studien werden Szenarien untersucht, die sich zum Teil deutlich voneinander unterscheiden. Dies liefert zwar einen guten Überblick über die Bandbreite der Untersuchungen, die Ergebnisse sind jedoch nicht direkt miteinander vergleichbar und weichen zum Teil voneinander ab. Das bedeutet, dass eine Übertragbarkeit auf weitere Szenarien nur bedingt gegeben ist. Außerdem werden die speziellen Anforderungen an die für den Transport großer Aktivitätsmengen vorgesehenen Schiffe der Klasse INF 3 nur in einem Teil der Studien berücksichtigt. Des Weiteren ist insbesondere die Vernachlässigbarkeit der radiologischen Auswirkungen durch eine atmosphärische Freisetzung aus der dargestellten SNL-Studie nicht komplett nachvollziehbar, da nur Kollektivdosen und über 50 Jahre gemittelte mittlere Personendosen angegeben werden, jedoch keine Betrachtungen für eine maximal exponierte Person.

Insgesamt können jedoch insbesondere die qualitativ getroffenen Aussagen über die geringen Wahrscheinlichkeiten für Schiffsunfälle nachvollzogen werden und auch die Ergebnisse zu den radiologischen Auswirkungen einer Freisetzung im Ozean erscheinen plausibel.

#### 4.4 Schiene

Für den Verkehrsträger Schiene existieren ältere Transportsicherheitsanalysen, wie beispielsweise /PSE 85/ oder die Transportstudien Konrad (TSK 1991 /GRS 91/ und TSK 2009 /GRS 10/). Eine Aktualisierung dieser Datengrundlage für zukünftige Aussagen zu erwarteten Unfallhäufigkeiten war ursprünglich geplant, konnte jedoch nicht mehr realisiert werden (vgl. Abschnitt 4.1), da die Daten zu Bahnbetriebsunfällen vom Eisenbahnbundesamt (EBA) erst nach Ablauf des Arbeitspunktes zur Verfügung standen.

Eine aktuellere Studie /NRC 14/ wurde von der US-amerikanischen Behörde NRC (Nuclear Regulatory Commission) durchgeführt und wird im Folgenden zusammengefasst. Die Studie NUREG<sup>13</sup>-2125 /NRC 14/ hat zum Ziel das radiologische Risiko für den Transport abgebrannter Brennelemente, sowohl für den Routinetransport als auch für Transportunfälle, mit den modernsten Daten und Modellen zu analysieren. Sie behandelt von der amerikanischen Behörde NRC zugelassene Versandstücke und basiert auf allgemeinen und konservativen Annahmen. Sie baut im Wesentlichen auf den zwei Vorgängerstudien NUREG-0170 /NRC 77/ und NUREG/CR<sup>14</sup>-6672 /SPR 00/ auf. Betrachtet wurde der Transport auf der Straße, der Schwerpunkt liegt jedoch auf dem Schienentransport. Es handelt sich um eine kombinierte Studie, d. h. es werden sowohl die Wahrscheinlichkeiten von Unfällen als auch deren Auswirkungen, z.B. in Form von Kollektivdosen, Personendosen oder Dosisrisiken<sup>15</sup>, analysiert.

Untersucht wurden die drei Szenarien:

- Unfallfreie Beförderung,
- Unfälle bei denen das Versandstück nicht beschädigt wird,
- Unfälle bei denen das Versandstück beschädigt wird (Verlust von Abschirmung oder Freisetzung).

Für die beschriebene Studie wurden drei Versandstück-Typen (eines für den Straßen-transport, zwei für den Schienentransport) ausgewählt, d. h. es wurden reale Konstruktionen anstatt generischer verwendet. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass in der Analy-

---

<sup>13</sup> NRC technical report designation (**N**uclear **R**egulatory Commission)

<sup>14</sup> NUREG contractor report

<sup>15</sup> Produkt aus der Unfallwahrscheinlichkeit und der verursachten Dosis (in Sv)

se reale Sicherheitsmargen gegenüber den gesetzlichen Vorgaben berücksichtigt werden können. Die gesetzlichen Anforderungen an Typ B-Versandstücke werden in den USA durch den *US Code of Federal Regulations /CFR 12/* in dem die Vorschriften der IAEA aus den SSR-6 /IAEA 12/ umgesetzt werden. Der Nachteil der angewandten Methode ist jedoch, dass aus Zeit- und Kostengründen nicht alle verfügbaren Behälterkonstruktionen untersucht werden konnten und somit können auch keine generischen Aussagen getroffen werden. Des Weiteren wurde für den Straßentransport keine detaillierte Aufprallanalyse durchgeführt, da frühere Analysen gezeigt haben, dass diese Arten von Versandstücken geringere Freisetzungswahrscheinlichkeiten aufweisen als Versandstücke für den Schienentransport.

### **Wahl der Versandstücke für die Analyse**

Zur Analyse des Transportrisikos für den Straßentransport wurde der Behälter GA-4 von *General Atomics* verwendet. Dieser Behälter besitzt eine wasserstoffhaltige Neutronen-Abschirmung und ist aufgebaut aus Schichten von Stahl, abgereichertem Uran zur Gamma-Abschirmung und einer erneuten Stahlschicht. Er wurde für die Studie NUREG-2125 /NRC 14/ ausgewählt, da es vier Brennelemente aus Druckwasserreaktoren aufnehmen kann und somit eine relativ große Kapazität besitzt.

Zur Analyse des Transportrisikos für den Schienentransport wurden zum direkten Vergleich zwei aus unterschiedlichen Materialien (Stahl bzw. Stahl-Blei-Stahl) aufgebaute Behälter ausgewählt. Außerdem erlauben die durchgeführten Analysen einen Vergleich sowohl zwischen der Beförderung von direkt mit abgebrannten BE beladenen Behältern und Transportbehältern mit einem Innenbehälter als auch zwischen der Verwendung von elastomeren und metallischen Dichtungsringen.

Der Behälter HI-STAR 100 von *Holtec International* besitzt eine polymere Neutronen-Abschirmung und ist aus mehreren Schichten von Stahl aufgebaut. Es hat eine Kapazität für den Transport von 24 DWR- bzw. 68 SWR-BE. Diese BE werden vor der Beladung in einen verschweißten Innenbehälter eingebracht. Der Behälter wurde für die Analyse ausgewählt, da es das einzige moderne und von der NRC zertifizierte Versandstück in einer komplett auf Stahl basierten Bauweise war.

Der zweite im Rahmen der Studie untersuchte Behälter für den Schienentransport ist der Behälter NAC-STC der Firma *NAC International*. Er besitzt eine polymere Neutronen-Abschirmung und ist aufgebaut aus Schichten von Stahl, Blei zur Gamma-

Abschirmung und einer erneuten Stahlschicht. Es können 26 direkt beladene DWR-BE bzw. ein Transport- und Lagerbehälter transportiert werden und es können entweder elastomere oder metallische Dichtungsringe verwendet werden. Der Behälter wurde für die Studie ausgewählt, da er der einzige der modernen NRC zertifizierten Behälter war, in dem BE sowohl direkt als auch mit Innenbehälter transportiert werden dürfen.

### **Analyse der mechanischen Belastungen**

Für frühere Risikoanalysen wurden meist generische Versandstücke verwendet, die den regulatorischen Anforderungen an Typ B Versandstücke entsprechen. Im Gegensatz dazu wurden für die Studie NUREG-2125 /NRC 14/ reale Behälter analysiert, die Sicherheitsmargen auch über die regulatorischen Anforderungen hinaus besitzen. Hierfür wurden Finite-Elemente-Analysen der Versandstücke mit dem Code *PRESTO* /SIE 09/ durchgeführt, die sich auf vier Aufprallgeschwindigkeiten auf ein unnachgiebiges Fundament (48 km/h (entspricht einem freien Fall aus 9 m Höhe), 97 km/h, 145 km/h, 193 km/h) und drei verschiedene Orientierungen der Versandstücke beim Aufprall (horizontal, vertikal, Kante) beziehen. Außerdem wurden die Belastungen der Brennelemente mit dem Finite-Elemente-Analysecode *Abaqus/Explicit* /HIB 98/ untersucht. Für den Straßentransport wurde keine neue Aufprallanalyse durchgeführt, da frühere Analysen (z. B. NUREG/CR-6672 /SPR 00/) mit generischen Versandstücken gezeigt haben, dass Versandstücke für den Straßentransport geringere Wahrscheinlichkeiten für eine Freisetzung oder einen Verlust von Abschirmung aufweisen als Versandstücke für den Schienentransport.

Für den Behälter HI-STAR 100 wurden die stärksten Belastungen für einen horizontalen (seitlichen) Aufprall ermittelt. Hier treten ab einer Geschwindigkeit von 145 km/h erste Schäden am Transportbehälter auf, so dass Undichtheiten des Versandstücks auftreten, jedoch bleibt auch bei Geschwindigkeiten von 193 km/h der Innenbehälter intakt. Somit wird in allen analysierten Szenarien keine Freisetzung radioaktiver Stoffe erwartet.

Die stärksten Belastungen für den Behälter NAC-STC wurden ebenfalls für einen horizontalen Aufprall ermittelt. Hier treten ab einer Geschwindigkeit von 97 km/h erste Verformungen auf. Das bedeutet, dass es bei der Verwendung von Metalldichtungen zu Undichtheiten kommen kann. Bei direkt beladenen Behältern käme es somit zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe. Ab einer Geschwindigkeit von 145 km/h bilden sich auch Undichtheiten bei der Verwendung von elastomeren Dichtungen. Im Falle einer

Verwendung von zusätzlichen Innenbehältern für die BE wird jedoch in keinem der untersuchten Szenarien eine Freisetzung radioaktiver Stoffe erwartet. Nichtsdestotrotz kann es durch die entstandenen Verformungen durch den Aufprall zu einem Verrutschen der Bleiabschirmung kommen. Diese treten bei einem Kanten-Aufprall ab Geschwindigkeiten von 97 km/h auf.

### **Analyse der thermischen Belastungen**

Zur Analyse der thermischen Belastungen wurden zunächst Simulationen zu den thermischen Anforderungen aus den Vorschriften der NRC durchgeführt. Das bedeutet, das Versandstück wurde einer homogenen Hitzebelastung von 800 °C für 30 min ausgesetzt. Zur Modellierung der internen thermischen Belastungen durch diese gleichförmige Erhitzung wurde der Finite-Elemente Wärmeaustausch-Code *Patran/Thermal* der MSC Software Corporation /MSC 08/ verwendet. Zusätzlich wurde die Reaktion der Versandstücke auf ein 30 min dauerndes Lachenfeuer mit einer Kombination der Computer-Codes *CAFE /SUO 05/* und *Patran/Thermal* ermittelt. Neben diesem Szenario wurden drei weitere Brandszenarien simuliert:

- Vollumschließendes Feuer um das am Boden liegende Versandstück,
- Feuer mit 3 m Abstand vom Versandstück,
- Feuer mit 18 m Abstand vom Versandstück,

wobei für das Versandstück für den Straßentransport nur das vollumschließende Feuer betrachtet wurde, da hier keine der Temperaturgrenzwerte erreicht wurden und die beiden anderen Szenarien weniger Schaden anrichten würden. Die Brenndauer entspricht 3 h für die Schienen-Versandstücke, was dem unwahrscheinlichen Fall entspricht, dass der Inhalt eines Schienentankwagens (113.562 l) das Feuer konstant unterhalten würde und 1 h für das Straßen-Versandstück, was dem Fall entspricht, dass der Inhalt eines Tankkraftwagens (34.070 l) das Feuer konstant unterhalten würde. Für alle Szenarien wurde angenommen, dass die Neutronen-Abschirmung direkt nach Eintritt des Feuers schmilzt und aus dem Versandstück ausfließt.

Die Ergebnisse für alle durchgeführten Analysen waren, dass es bei keinem der betrachteten Behälter zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen kommen würde, jedoch wird für den Behälter NAC-STC ein Teilverlust der Gamma-(Blei-)Abschirmung erwartet.

## Analyse der Unfallhäufigkeiten und Auswirkungen

In der Studie NUREG-2125 /NRC 14/ wurden zwei Arten von Unfällen unterschieden:

- Unfälle ohne Beschädigung des Versandstücks bzw. ohne Auswirkungen auf das Versandstück,
- Unfälle mit Auswirkungen auf das Versandstück (Verlust der Abschirmung oder Freisetzung).

Erhöhte Dosiswerte für den ersten Fall ergeben sich im Wesentlichen durch einen längeren Aufenthalt des Versandstücks am Unfallort<sup>16</sup>.

Es wurden Unfälle mit großen LKWs und mit Güterzügen im Zeitraum von 1996 bis 2007 analysiert. Dabei wurde auf Unfallstatistiken zurückgegriffen, die vom DOT<sup>17</sup> aufgezeichnet wurden. Die ermittelten Unfallraten sind 0,0019 Unfälle auf 1000 km für den Straßen- bzw. 0,00011 Unfälle auf 1000 km für den Schienentransport.

Zur Analyse der Wahrscheinlichkeit, dass ein Unfall passiert, der schwer genug ist, dass es zu einem Verlust von Abschirmung oder einer Freisetzung kommen kann wurden Ereignisbäume verwendet, die in den Veröffentlichungen von Mills et al. (2006) /MIL 06/ für den Straßentransport bzw. Volpe (2006) /VOL 06/ ermittelt wurden. Die bestimmten Wahrscheinlichkeiten für diese schweren Unfälle sind aufgrund ihrer niedrigen Häufigkeit relativ ungenau, jedoch sind, nach Angabe der Autoren, die angegebenen Größenordnungen korrekt.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass bei 99,95 % aller Zugunglücke die mit einem Aufprall verbunden sind die Belastungen, denen ein Versandstück nach den von der NRC gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen standhalten muss, nicht überschritten werden. Des Weiteren kann es bei den analysierten Unfallszenarien und somit bei der Betrachtung der drei realen Versandstücke nur für das Versandstück NAC-STC zu einem Verlust von Gamma-Abschirmung bzw. zu einer Freisetzung kommen. Jedoch liegt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Unfall weder zu einem Verlust von Gamma-Abschirmung noch zu einer Freisetzung führt bei über 99,999999 %. Eine Freisetzung

---

<sup>16</sup> Für die Dauer bis zur Bergung des Versandstücks wurde ein Zeitraum von 10 h angenommen.

<sup>17</sup> Department of Transportation



kann außerdem nur dann auftreten, wenn der Behälter direkt mit den BE beladen wurde, d. h. wenn sich die BE nicht in einem Innenbehälter befinden.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Unfall mechanische Belastungen für das Versandstück auftreten, die einen Verlust der Gamma-(Blei-)Abschirmung von mehr als einem Prozent verursachen können, liegt bei etwa  $8,3 \cdot 10^{-10}$ , die Wahrscheinlichkeit, dass überhaupt ein Unfall bei einem Transport passiert liegt bei  $10^{-3}$ . Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall mit Abschirmungsverlust, der zu einer Überschreitung der vorgeschriebenen Maximaldosis<sup>18</sup> führt, im Bereich von  $10^{-12}$  liegt. Der schwerste analysierte Unfall, d. h. ein Aufprall auf ein unnachgiebiges Fundament mit 193 km/h, führt zu einem Verrutschen und somit zu einem Verlust von 7,25 % der Blei-Abschirmung. Für dieses Szenario wurde der *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) Transport-Code<sup>19</sup> zur Berechnung der Photonendichte verwendet und mit Hilfe des Computer-Code Modells *RADTRAN /DEN 08/* wurde daraus die Dosis für die maximal exponierte Person in einem Abstand von 1 m zum Versandstück berechnet. Es ergab sich eine Dosisleistung von 46 mSv/h.

Die Gesamtwahrscheinlichkeit für einen Unfall, der zu einem Verlust der Blei-Abschirmung durch einen Brand führt, so dass von der NRC vorgeschriebene Grenzwerte überschritten werden, ist geringer als diejenige für einen Aufprall und wird mit Werten im Bereich von  $10^{-17}$  bis  $10^{-13}$  angegeben. Für den schweren Brandfall, also das 3 h dauernde vollumschließende Feuer, ergab die durchgeführte Analyse einen maximalen Verlust der Abschirmung von 8,1 %. Unter Annahme eines gleichförmigen Verlusts der Abschirmung des Versandstücks wurde mit Hilfe des Computer-Code Modells *RADTRAN /DEN 08/* eine Dosisleistung für die maximal exponierte Person von 35 mSv/h in einer Entfernung von 1 m ermittelt.

Neutronen werden in Luft wesentlich besser absorbiert als Gamma-Strahlung, deshalb betrifft ein Verlust der Neutronen-Abschirmung hauptsächlich Personen in der Nähe des Versandstücks. Die Analyse zeigt, dass die Neutronen-Abschirmung durch einen Aufprall nicht ernsthaft beschädigt würde, jedoch ist die Neutronen-Abschirmung aller drei betrachteter Versandstücke entflammbar und kann somit durch einen Brand zerstört werden. Die Wahrscheinlichkeit für solch einen Brand liegt für einen LKW-Unfall

---

<sup>18</sup> Unter den in den Regularien vorgeschriebenen Unfallbedingungen darf die Dosisleistung 10 mSv/h in einer Entfernung von 1 m vom Versandstück nicht überschritten werden.

<sup>19</sup> <https://mcnp.lanl.gov/>

bei etwa  $6,3 \cdot 10^{-3}$  und für einen Güterzug-Unfall bei etwa  $10^{-7}$ . Der Unterschied ist bedingt durch die Tatsache, dass es beim Straßentransport mit dem Tank des LKWs immer eine Brandquelle gibt und dass bei der Unfallstatistik für den Straßentransport keine Unterscheidungen nach der Schwere des Feuers verfügbar waren. Die, unter Annahme eines vollständigen Verlusts der Neutronen-Abschirmung, mit Hilfe von *RADTRAN /DEN 08/* ermittelte Dosis für eine Person mit einem mittleren Abstand von 5 m von dem Versandstück liegt für alle Versandstücke bei ähnlichen Werten um  $7,5 \text{ mSv}/10 \text{ h}$ , d. h. unter dem in den US-Regularien /CFR 12/ definierten Grenzwert.

Sieben der analysierten Unfallszenarien mit dem Versandstück NAC-STC können zu einer Freisetzung führen, wenn sich die BE nicht in einem Innenbehälter befinden. Die Gesamtwahrscheinlichkeit, dass ein Unfall zu einer Freisetzung führt liegt bei  $1,08 \cdot 10^{-9}$  für Versandstücke mit Metaldichtungen bzw. bei  $3,57 \cdot 10^{-10}$  für Versandstücke mit elastomeren Dichtungen. Die Dispersion wurde mit *RADTRAN /DEN 08/* modelliert, mit dem Ergebnis, dass die maximale Luftkonzentration bei neutralen Wetterbedingungen 21 m in Windrichtung vorliegt. Die resultierende Dosis für die maximal exponierte Person<sup>20</sup> wird im Wesentlichen durch die Inhalation von Radionukliden verursacht und liegt bei  $1,6 \text{ Sv}$ . Auch ein lang andauerndes Feuer könnte theoretisch Schäden am Versandstück anrichten, die zu einer Freisetzung führen, jedoch keines der in dieser Studie analysierten Feuer. Die Wahrscheinlichkeit für das schwerste der analysierten Feuer, das bei einem Unfall auftreten kann, liegt bei  $10^{-19}$ , d. h. dass Brände, die eine Freisetzung zur Folge hätten noch geringere Wahrscheinlichkeiten aufweisen.

### **Bewertung der Studie**

Die US-amerikanische Studie NUREG-2125 /NRC 14/ kommt zu dem Ergebnis, dass eine Freisetzung radioaktiver Stoffe nur für direkt beladene Behälter und nur für eines der drei untersuchten Versandstücke auftreten kann. Die dafür notwendige Belastung für ein Versandstück tritt bei etwa einem von einer Milliarde Unfällen auf. Auch ein Teilverlust der Gamma-Abschirmung kann nur für dieses eine Versandstück auftreten. Die Wahrscheinlichkeit hierfür liegt in der gleichen Größenordnung wie für eine Freisetzung.

---

<sup>20</sup> Maximal exponierte Person: Eine Person, die sich für 10 Stunden am Ort mit der höchsten Konzentration der potenziellen Freisetzungen aufhält.

Die Betrachtung realer Versandstücke (anstatt generischer) bietet den Vorteil, dass reale Sicherheitsmargen in die Transport-Risikoanalyse einfließen. Der wesentliche Nachteil dieser Herangehensweise ist die Notwendigkeit zur Beschränkung auf einige wenige Versandstücke. Somit muss insbesondere die Übertragbarkeit der erlangten Ergebnisse auf in Deutschland verwendete Versandstück-Typen in Frage gestellt werden.

Eine weitere Aussage der durchgeführten Studie war, dass bei 99,95 % aller Güterzug-Unfälle geringere Belastungen auftreten als das Versandstück auslegungsbedingt standhalten können muss. Eine Übertragbarkeit dieses Ergebnisses auf Verhältnisse in Deutschland gestaltet sich auch hier als schwierig. Die typischen Geschwindigkeiten im Güterverkehr sind zwar für beide Länder ähnlich, jedoch können weitere Faktoren, wie z. B. die Verkehrsdichte, deutlichen Einfluss auf angegebene Unfallwahrscheinlichkeit haben.

## 4.5 Straße

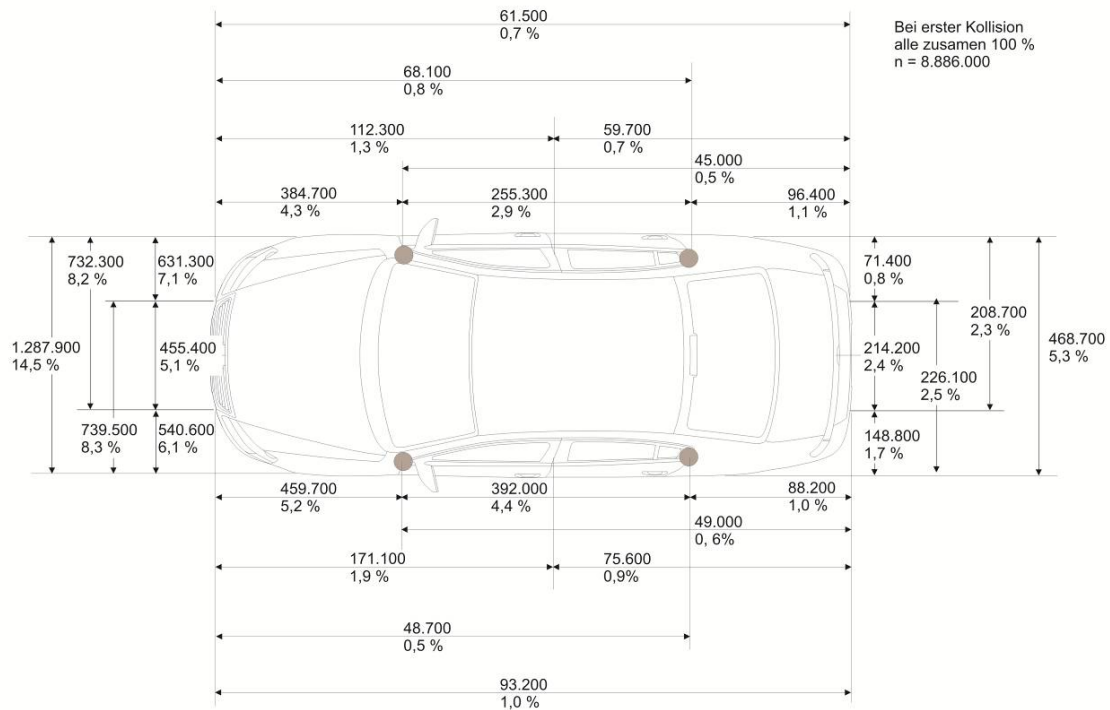
Detaillierte Untersuchungen zu Unfallabläufen werden aufgrund des erheblichen öffentlichen Interesses und der Vielzahl der Verkehrsteilnehmer insbesondere beim Verkehrsträger Straße durchgeführt.

Die DEKRA besitzt für den Verkehrsträger Straße auf dem Gebiet der Unfallforschung langjährige Erfahrung und hat Zugang zu nationalen und internationalen Datenbanken, die das Verkehrsunfallgeschehen in geeigneter Weise abbilden. Hervorzuheben sind dabei insbesondere die GIDAS<sup>21</sup>- (German In-Depth Accident Study) und die DEKRA-Unfalldatenbank, da in Ihnen Datenmaterial erfasst wird, das eine detaillierte Unfallrekonstruktion und somit auch eine Analyse der aufgetretenen Unfallbelastungen ermöglicht. Die GIDAS-Datenbank gilt darüber hinaus als repräsentativ für das Unfallgeschehen und ermöglicht eine Hochrechnung der gewonnenen Ergebnisse auf das gesamtdeutsche Unfallgeschehen. Daher wurde die DEKRA mit der Bereitstellung der für das Vorhaben relevanten Daten zum schweren Unfallgeschehen beauftragt. Die DEKRA hat hierzu verschiedene ihrer zugänglichen Datenbanken ausgewertet.

Eine mögliche Auswertung der in der GIDAS-Datenbank enthaltenen Unfalldaten zeigt Abb. 4.1, in der die Häufigkeitsverteilung der PKW-Kollisionsbereiche und die Hochrechnung der Daten auf das gesamte PKW-Unfallgeschehen in Deutschland dargestellt sind. Da in der GIDAS-Datenbank auch Informationen über die beim Unfallablauf aufgetretenen Geschwindigkeiten enthalten sind, lässt sich ermitteln, mit welcher Häufigkeit Unfälle innerhalb eines bestimmten Geschwindigkeitsintervalls auftreten.

---

<sup>21</sup> <http://www.gidas.org/>



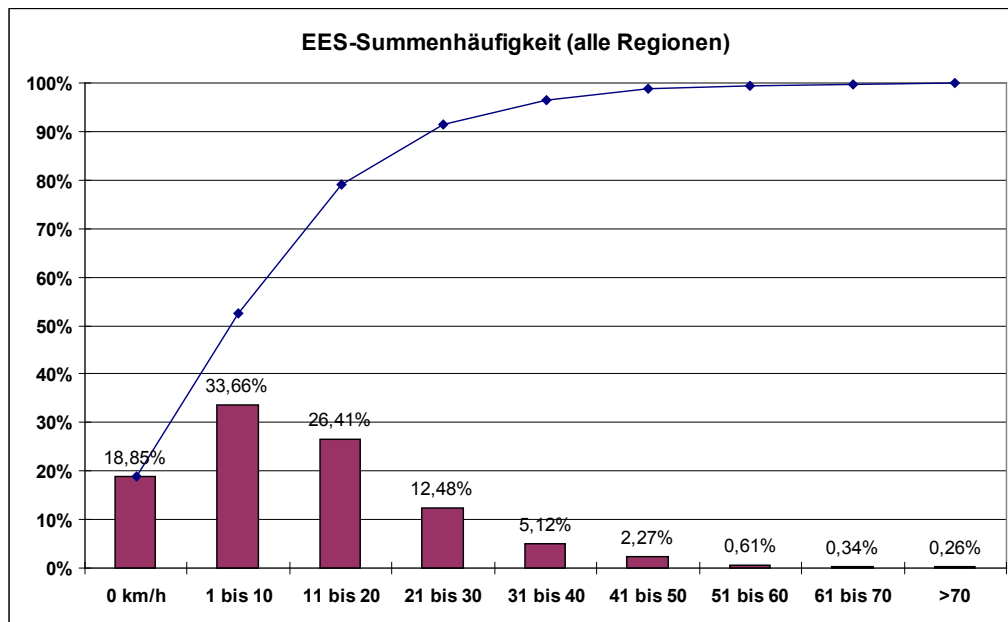
Sonstige (Dach, Unterboden, unbekannt, usw.) 700.600; 7,9 %

**Abb. 4.1** Verteilung der Kollisionsbereiche bei PKW aus den Daten der GIDAS Datenbank (Hochrechnung auf das gesamte PKW-Unfallgeschehen in Deutschland) /DEK 13/

### Mechanische Unfalleinwirkungen und EES-Wert

In der Unfallforschung dient der EES-Wert (Energy Equivalent Speed) als Referenzwert für die beim Unfall auf das Fahrzeug einwirkenden mechanischen Belastungen. Die Angabe des EES-Wertes in km/h entspricht der Kollisionsgeschwindigkeit eines Fahrzeugs auf ein starres und keine Energie aufnehmendes Hindernis und ist damit ein Maßstab für die Deformationsenergie, die beim Aufprall am Fahrzeug umgesetzt wird. Nach dem Anprall besitzt das Fahrzeug in dieser Betrachtungsweise keine Restenergie mehr, d. h. Wegschleudern bzw. Zurückprallen werden nicht berücksichtigt und die gesamte kinetische Energie wird als Deformationsenergie am Fahrzeug selbst umgesetzt. Auf diese Weise können Deformationsbildern an Fahrzeugen EES-Werte zugeordnet werden, die wiederum als Maßstab für die beim Unfallablauf aufgetretenen mechanischen Belastungen herangezogen werden können. Dies ermöglicht prinzipiell einen quantitativen Vergleich der im realen Unfallgeschehen auftretenden Belastungen, mit den Belastungen die nach den IAEO-Transportvorschriften bei den mechanischen Prüfungen von den Versandstücken zu fordern sind.

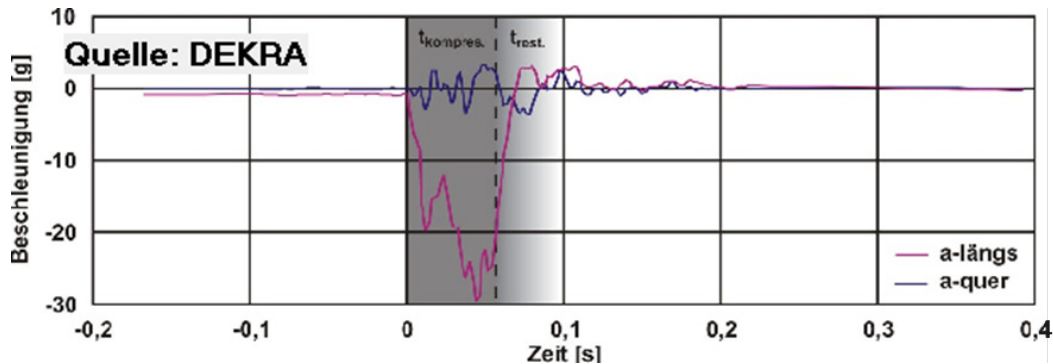
Auszugsweise soll dies anhand von PKW-Kollisionen dargestellt werden, für die über die GIDAS Datenbank von der DEKRA eine Abfrage bezüglich der Verteilung der EES-Werte erstellt wurde. Insgesamt konnten 10 873 EES-Werte bestimmt werden, für die sich unter Berücksichtigung sämtlicher Anstoßregionen und Anstoßrichtungen die in Abb. 4.2 gezeigte Summenhäufigkeit ergibt.



**Abb. 4.2** Anteil der aufgetretenen EES-Werte je Geschwindigkeitsklasse und ihre Summenhäufigkeit /DEK 13/

Die Übertragung der anhand der Unfalldaten ermittelten EES-Werte auf die Prüfanforderungen nach den IAEO-Transportvorschriften erfordert allerdings eine vergleichende Betrachtung der einerseits bei den Fahrzeugkollisionen und andererseits bei den IAEO-Prüfungen auftretenden Verzögerungswerte, die letztlich die Krafteinwirkung bestimmen. Die auftretenden Kräfte ergeben sich dabei aus der Geschwindigkeit und der Verzögerungszeit. Anhaltspunkte hierfür sind die Verzögerungskurven, die beispielsweise bei der Unfallforschung der DEKRA bestimmt bzw. bei den Fallversuchen der BAM ermittelt werden. Das in den Prüfanforderungen nach /IAEA 12/ geforderte unachgiebige Hindernis führt zu sehr kurzen Verzögerungszeiten, in denen die gesamte kinetische Energie des Falls umgesetzt wird, so dass entsprechend hohe Verzögerungswerte auftreten. Allerdings sind quantitative Angaben der Verzögerungszeiten aufgrund der Vielzahl der Versandstücke und der unterschiedlichen Bedingungen bei den Fallprüfungen nur in Einzelfällen möglich.

Ein Beispiel für die beim Crashtest eines PKWs auftretenden Verzögerungswerte ist in Abb. 4.3 gezeigt. Der maximale Verzögerungswert liegt im dargestellten Beispiel bei  $30 g^{22} = 294,3 \text{ m/s}^2$  bei einer Anprallgeschwindigkeit von 50 km/h.



**Abb. 4.3** Verzögerungskurve (Längs- und Querbearbeitung) beim Anprall eines PKWs auf eine starre Barriere mit 50 km/h /DEK 13/

Die von der BAM beim 9 m-Horizontalfall eines CONSTOR V/TC ermittelten Verzögerungszeiten liegen nach /NEU 09/ bei ca. 0,004 s und können zu Verzögerungswerten bis zu ca. 340 g führen.

Anhand des dargestellten Beispiels wird deutlich, dass sich die mechanischen Belastungen, die in Unfallsituationen auftreten, durch Untersuchungen in der Unfallforschung derart quantifizieren lassen, dass eine Übertragung auf die bei den Prüfanforderungen wirkenden Belastungen unter gewissen Rahmenbedingungen erfolgen kann.

Die Abbildung Abb. 4.2 lässt zur groben quantitativen Abschätzung die Schlussfolgerung zu, dass in mindestens 98,8 % der Unfälle die auftretenden mechanischen Belastungen durch die Prüfbedingungen der IAEO abgedeckt werden.

### Thermische Unfälleinwirkungen

Thermische Unfälleinwirkungen spielen bei der Bewertung von Unfallsituationen eine entscheidende Rolle und werden bei unfallsicheren Versandstücken durch entsprechende Prüfanforderungen abgebildet. In den IAEO-Transportvorschriften wird für unfallsichere Versandstücke ein vollständig umhüllendes Feuer bei 800 °C für mindestens

<sup>22</sup> Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

30 Minuten unterstellt. Derartige Temperaturen können beim Unfallgeschehen etwa durch den Abbrand von Fahrzeugbauteilen oder Treibstoffen wie Benzin oder Diesel entstehen. Um Branddauern von über 30 Minuten zu erreichen, ist eine entsprechende Brandlast erforderlich, die beispielsweise von anderen beteiligten Verkehrsteilnehmern, oder durch die Randbedingungen der Unfallsituation – etwa beim Flugzeugabsturz in eine Lagerhalle oder durch das in Containern gelagerte Material auf Schiffen – bereitgestellt wird. Als besonders kritisch sind Brandsituationen in geschlossenen Räumen anzusehen, etwa im Innern eines Schiffes oder bei Unfällen in Tunneln. Bei Brandsituationen in Folge eines Unfalls ist zudem zu berücksichtigen, dass die Feuerwehr aus einsatztaktischen Gründen auf ein Löschen des Brandes verzichten kann, da ein kontrollierter Abbrand je nach Unfallsituation leichter beherrschbar ist. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 4.4.



**Abb. 4.4** Abbrand eines Lasters nach einer Kollision (Quelle: DEKRA Unfalldatenbank) /DEK 13/

Im gezeigten Beispiel trat in Folge einer Kollision Heizöl des Tankaufliegers eines Sattelzuges aus und geriet in Brand. Ein zweiter auffahrender Sattelzug, der Altreifen geladen hatte, vergrößerte die Brandlast weiter.

Das Auftreten thermischer Belastungen ist nicht alleine auf Gefahrguttransporte beschränkt. Insbesondere Güter wie Butter, Speiseöle oder Reifen können die Brandlast



erheblich vergrößern und damit die Randbedingungen der Unfallsituation hin zu der in den Prüfanforderungen unterstellten 30 Minuten Branddauer verschieben.

Belastbare statistische Daten zu Fahrzeugbränden liegen in Deutschland nicht vor. Bei der polizeilichen Unfallaufnahme wird das Merkmal Brand nicht erfasst und tritt demzufolge in den amtlichen Unfallstatistiken auch nicht auf. 1999 wurden in der Statistik des Gesamtverbandes der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) 28 996 Brandschäden erfasst: 20 220 dieser Fälle waren Brände im versicherungsrechtlichen Sinne, wobei lediglich bei 2–3 % Unfälle als Ursache auftraten. Bei 8 776 Fällen traten Schmorbrände ohne offene Flammen auf.

Insgesamt sind Brandereignisse im Straßenverkehr, bei denen die Randbedingungen der IAEO-Prüfanforderungen für Typ B Versandstücke auftreten, seltene Einzelereignisse, bei denen eine der folgenden Voraussetzungen erfüllt sein muss:

- Brände in Tunneln/Garagen (erschwerter Wärmeabfuhr)
- Brände mit brennbaren LKW-Ladungen mit hohem Heizwert

Um die Gefahren von Fahrzeugbränden abschätzen zu können, hat der GDV eine Datenanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse in Tab. 4.2 dargestellt sind. Es wird deutlich, dass die Zahl der unfallbedingten Brände sehr gering ist, die Brandwahrscheinlichkeit jedoch mit der Schwere des Unfalls ansteigt.

**Tab. 4.2** Ergebnisse der Studie des Gesamtverbandes der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) zu Unfallfolgebränden /DEK 13/

<b>Jahr</b>	<b>Unfälle</b>	<b>Projekt</b>	<b>Brandunfälle</b>	<b>Fahrzeuge</b>
1974	28 936	FS74	68 (0,24%)	
1990	15 000	Pkw/Pkw-Kollisionen mit mind. einem Personenschaden	38 (0,25%)	44 (0,15%)
1994	204	Tödliche Unfälle auf bayrischen Autobahnen	25 (12,0%)	29 (7,9%)
2001	1 111	Pkw/Pkw-Kollisionen mit mindestens MAIS 3 <sup>23</sup> oder mehr	33 (2,97%)	38 (1,71%)
2001	435	FS2000 (Großschäden)	7 (1,6%)	7 (0,8%)

### Zusammenfassung

Mit Hilfe der Datenbereitstellung durch die DEKRA konnten Informationen aus der Unfallforschung gewonnen werden, die eine Übertragung der Unfallparameter auf die bei den IAEO-Prüfungen für Transportbehälter geforderten Belastungen ermöglichen. Die Häufigkeitsverteilung der in Abb. 4.2 dargestellten EES-Werte ist hierfür ein Beispiel und zeigt mit welcher Wahrscheinlichkeit bei PKW-Kollisionen mechanische Belastungen auftreten. Die mechanischen Belastungen aus den Prüfanforderungen können für die verschiedenen Falltests mit der Häufigkeitsverteilung aus Abb. 4.2 verglichen werden, so dass prinzipiell abgeschätzt werden kann, mit welcher Häufigkeit es beim Unfallgeschehen zu einer Überschreitung der Prüfanforderungen kommen kann. Bei dieser Betrachtung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Behälterbelastungen in einer Unfallsituation generell überschätzt werden, da die Stoßenergie des Aufpralls in einer realen Unfallsituation zunächst durch die Deformation der Fahrzeugkarosserie und eventuell weiterer, den Stoß dämpfenden Teile, abgebaut wird. Die angegebenen EES-Werte sind demnach nicht unmittelbar auf die Ladung des Fahrzeugs übertragbar, sie können nur für eine obere Abschätzung verwendet werden.

---

<sup>23</sup> Maximaler Abbreviated Injury Scale-Wert (MAIS-Wert); Der AIS-Wert dient als Maßstab zur Bewertung der schwere von Einzelverletzungen nach einer Unfallsituation. Die Skala reicht von 0 (unverletzt) bis 6 (nicht behandelbar). Ein AIS-Wert von 3 entspricht der Verletzungsschwere „Schwer“.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Versandstück einen Unfallgegner vorzufinden, der ein unnachgiebiges Hindernis darstellt, stark von den Eigenschaften des Versandstücks, insbesondere seiner Masse, abhängt.

Die in den vorangestellten Abschnitten beschriebenen Rahmenbedingungen erschweren es, die Häufigkeit von Unfallsituationen anzugeben, die geeignet sind, die Prüfanforderungen beispielsweise für Typ B Versandstücke zu überschreiten. Unfallsituation bei denen extreme mechanische und/oder thermische Belastungen auftreten, sind seltene Ereignisse, die sich häufig durch das ungünstige Zusammenwirken mehrerer Faktoren ergeben. So wäre beispielsweise ein Tunnelbrand, der durch den Zusammenstoß zweier LKW mit einer die Brandlast erhöhenden Ladung (wie z. B. Reifen) verursacht wird, geeignet Temperaturen oberhalb von 800 °C über einen Zeitraum von weit über 30 Minuten zu erzeugen.



## 5 Zusammenfassung / Bewertung

Die Analysen zur Quantifizierung der Unfallbelastungen bei den verschiedenen Verkehrsträgern haben gezeigt, dass geeignete Informationen z. T. nur begrenzt vorliegen, jedoch kann für alle Verkehrsträger die qualitative Aussage getroffen werden, dass Unfälle, bei denen Belastungen auftreten, die die Anforderungen an Versandstücke überschreiten, sehr unwahrscheinlich sind. Die in den ausgewerteten Studien der verschiedenen Verkehrsträger vorgenommene Quantifizierung des Abdeckungsgrades der Prüfbedingungen bzgl. realer Unfallereignisse wird jedoch kritisch gesehen.

So beruht beispielsweise eine statistische Auswertung von Flugunfall-Daten auf einer sehr geringen Datenbasis, so dass die Angemessenheit der Anforderungen an Typ C Versandstücke nur mit sehr großen Unsicherheiten bewertet werden kann. Allerdings resultiert die geringe Datenbasis auf sehr geringen Wahrscheinlichkeiten für Flugzeugunglücke, was die hohe Sicherheit im Flugverkehr unterstreicht.

Für den Schiffstransport existieren Untersuchungen verschiedener Unfallszenarien, wobei eine Übertragbarkeit auf weitere Szenarien oder ein direkter Vergleich der erzielten Ergebnisse nur bedingt möglich ist. Des Weiteren werden Anforderungen an die, für die Beförderung großer Aktivitätsmengen vorgesehenen, Schiffe der Klasse INF 3 nur in einem Teil der Studien berücksichtigt, da für diese Schiffe eine statistische Unfallanalyse nicht möglich ist.

Für den Verkehrsträger Schiene existiert, neben älteren Studien, die Studie NUREG-2125 /NRC 14/, in der Unfallwahrscheinlichkeiten und -belastungen auf spezielle Versandstücke untersucht werden. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studie auf Verhältnisse in Deutschland ist – aufgrund der Verwendung verschiedener Versandstücke und aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten – nur eingeschränkt möglich.

Für den Verkehrsträger Straße konnten durch Betrachtung der EES-Werte im Prinzip die bei realen Unfallgeschehen auftretenden Belastungen, mit den Belastungsanforderungen der IAEO-Transportvorschriften bei mechanischen Prüfungen verglichen werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Stoßenergie des Aufpralls in einer realen Unfallsituation zunächst durch die Deformation der Fahrzeugkarosserie und eventuell weiterer, den Stoß dämpfenden Teile, abgebaut wird, daher sind die angegebenen EES-Werte nicht unmittelbar auf die Ladung des Fahrzeugs übertragbar. Sie können jedoch

als oberer Wert für die Einwirkung verwendet werden. Eine Analyse von Brandbelastungen auf Versandstücke konnte nicht vorgenommen werden, da zu Fahrzeugbränden in Deutschland keine belastbaren statistischen Daten vorliegen.

Insgesamt weisen sämtliche ausgewerteten Studien und Untersuchungen darauf hin, dass die Anforderungen der IAEO hinsichtlich mechanischer und auch thermischer Belastungen an Versandstücke, einen hohen Abdeckungsgrad aufweisen. Das ursprüngliche Ziel dieses Arbeitspunktes, die genauere Quantifizierung dieses Abdeckungsgrades, war jedoch auf Basis der vorhandenen Studien u. a. aufgrund der dargelegten eingeschränkten Übertragbarkeit, nicht möglich.

## 6 Literatur

- /AMM 98a/ Ammerman, D.J., Koski, J.A., Sprung, J., SeaRAM: A U.S. DOE Study of Maritime Risk Assessment Data and Methods of Analysis, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1998
- /AMM 98b/ Ammerman, D.J., Ludwigsen, J.S., *Crush Loading to Radioactive Material Transportation Packages During Ship Collisions*, Int. J. Radioact. Mater. Transport 9 2, 1998
- /CFR 12/ U.S. Code of Federal Regulations (CFR), Packaging and Transportation of Radioactive Material, Part 71, Chapter 1, Title 10, 2012
- /DEK 13/ Ritter, S.; M. Egelhaaf, Entwurf: Datenbereitstellung Verkehrsunfallgeschehen: „Abdeckung des Verkehrsunfallgeschehen im Straßenverkehr durch die Prüfbedingungen nach IAEA SSR-6“, DEKRA Technology Center, Juni 2013
- /DEN 08/ Dennis, M.L. et al., Verification and Validation of RADTRAN 6.0, SAND2008-4556, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2008
- /DOR 95/ Dorofeev, S. B.; Sidorov, V. P.; Efimenko, A. A. et al.: Fireballs from Deflagration and Detonation of Heterogeneous Fuel-rich Clouds, Fire Safety Journal, Vol. 25, 323-336, 1995
- /GRS 91/ Lange, F.; Gründler, D.; Schwarz, G: Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad. Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS , Bericht GRS-84, Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 1991
- /GRS 10/ Sentuc, F.-N. et al.: Transportstudie Konrad 2009. Sicherheitsanalyse zur Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-256, Dezember 2009, mit Corrigendum vom April 2010, ISBN 978-3-939355-31-1
- /HIB 98/ Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., ABAQUS Standard User's Manual, Version 5.8, Pawtucket, RI, 1998

- /IAEA 61/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. 1961 Edition. Safety Series No. 6, IAEA, Vienna, 1961
- /IAEA 65/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. 1965 Edition. Safety Series No. 6, IAEA, Vienna, 1965
- /IAEA 73/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. 1973 Edition. Safety Series No. 6, IAEA, Vienna, 1973
- /IAEA 85/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. 1985 Edition. Safety Series No. 6, IAEA, Vienna, 1985
- /IAEA 96/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2012 Edition. Safety Standard Series No. ST-1, IAEA, Vienna, 1996
- /IAEA 01/ Atomic Energy Agency (IAEA), Severity, probability and risk of accidents during maritime transport of radioactive material, TECDOC-1231, IAEA, Vienna, 2001
- /IAEA 06/ Atomic Energy Agency (IAEA): Accident Severity During the Air Transport of Radioactive Material, Draft – Final report of a coordinated research project, September 2006
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2012 Edition. Safety Requirements No. SSR-6, IAEA, Vienna, 2012
- /KAY 93/ Kay, D., Probabilistic Assessment of “Nord Pas-de-Calais” Fire Scenarios, AEA Technology, Consultancy Services (SRD), Rep. AEA/CS/16401412/ZJ768/001, Atomic Energy Authority, Risley, 1993



- /KAY 95/ Kay, D., Woodward, P.E., Zahid, M., *Assessment of frequency of fire on a ship carrying irradiated nuclear fuel*, AEA Technology, Consultancy Services, AEA/CS/16401249/ZJ/1577/001, Atomic Energy Authority, Risley, 1995
- /LAN 98/ Lange, F., et al., *Evaluation of the Safety of Vitrified High Level Waste Shipments from UK to Continental Europe by Sea*, Rep. CEC Project 4.1020/D/96-001, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Cologne, 1998
- /LEI 98/ Lopicard, S., Raffestin, D., Rancillac, F., Poseidon Version 2.0: Application to a potential release in West Channel associated with the sea transportation of plutonium oxide, Proc. PATRAM '98, 12th Int. Conf. on Packaging and Transportation of Radioactive Waste, Vol. 4 (1998) 1461–1466, Paris, 1998
- /MIL 06/ Mills, G.S. et al., *Tractor/Trailer Accident Statistics*, SAND2006-7723, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2006
- /MSC 08/ MSC Software Corporation, *MSC PATRAN/Thermal*, Version 2008r2, MSC Software Corporation, Santa Ana, CA, 2008
- /NEU 09/ Neumann, M.: „Untersuchung des Verhaltens stoßdämpfender Bauteile von Transportbehältern für radioaktive Stoffe in Bauartprüfung und Risikoanalyse“, BAM-Dissertationsreihe Band 45, Berlin 2009
- /NRC 77/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC): *Final Environmental Statement on the Transportation of Radioactive Material by Air and Other Modes*, NUREG-0170, Washington DC, 1977
- /NRC 14/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC): *Spent Fuel Transportation Risk Assessment*, NUREG-2125, Final report, Januar 2014
- /POP 04/ Pope, R.: *Historical Background to the development of various Requirements in the international Regulations for the Safe Packaging and Transport of Radioactive Material*. Ramtrans Vol. 15, No. 1, Juni 2004

- /POP 13/ Pope, R.; Bajwa, Ch.; Malesys, P.; Zhao, Y.: Developing the Historical Basis for the Material and Package Classification and the Package Test Requirements of the International Transport Safety Regulations. In: Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2013, San Francisco, CA, August 18-23, 2013
- /PSE 85/ Schneider, K.; Jobst, C.: Sicherheitsanalyse der Transporte von radioaktiven Materialien für den Verkehrsträger Schiene, Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlussbericht, Berlin, Januar 1985
- /REA 96/ Reardon, P.C., Sprung, J.L., Validation of Minorsky's Ship Collision Model and Use of the Model to Estimate the Probability of Damaging a Radioactive Material Transportation Flask during a Ship Collision, Sandia National Laboratories, Rep. presented at Int. Conf. on Designs and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, SNAME and SNAJ, San Francisco, CA, 1996
- /SCH 99/ Schneider, T., Armingaud, F., Tabarre, M.: Statistical Analysis of Accident Data Associated with Sea Transport (Data from 1994-1997), Rep. CEPN-IPSN, NTE/99/02, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, 1999
- /SEL 91/ Selway, M., Smith, F.M., Bickley, A.M.: The Frequency of a Severe Fire on the Freight Ferry "Nord Pas-de-Calais", AEA Technology, Safety and Reliability Directorate, Rep. SRD/22459/NTL/001, Atomic Energy Authority, Risley, 1991
- /SEL 92a/ Selway, M., A: Study of Typical Times for the Duration of a Ship Fire, AEA Technology, Safety and Reliability Directorate, Rep. SRD/4045/NTL/002, Atomic Energy Authority, Risley, 1992
- /SEL 92b/ Selway, M., Kay, D., Carey, K.: Fire Modelling on the Rail Deck and in the Engine Room of the "Nord Pas-de-Calais", AEA Technology, Safety and Reliability Directorate, Rep. NPS/FGH/J363/P1, Atomic Energy Authority, Risley, 1992

- /SIE 09/ SIERRA Solid Mechanics Team, Presto 4.14 User's Guide, SAND2009-7401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2009
- /SPR 00/ Sprung, J.L. et al.: Re-Examination of Spent Fuel Risk Estimates, NUREG/CR-6672, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2000
- /SUO 01/ Suo-Anttila, J. M.; Gritz, L. A.: Thermal Measurements from a Series of Tests with a Large Cylindrical Calorimeter on the Leeward Edge of a JP-8 Pool Fire in Cross-Flow, SAND 2001-1986, Sandia National Laboratories, Juli 2001
- /SUO 05/ Suo-Anttila, A. et al., User Manual for CAFE-3D: A Computational Fluid Dynamics Fire Code, SAND2005-1469, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2005
- /TIE 95/ Tieszen, S. R.: Fuel Dispersal Modeling for Aircraft-Runway Impact Scenarios, SAND95-2529, Sandia National Laboratories, November 1995
- /TSU 99/ Tsumune, D., et al., Dose Assessment for Public by Packages Shipping Radioactive Materials Hypothetically Sunk into Shallow Sea, Central Research Institute of the Electric Power Industry (CRIEPI), Abiko, 1999
- /VOL 06/ Volpe Center, Spent Nuclear Fuel Transportation Risk, Draft Report, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA, 2006
- /YAM 98a/ Yamamoto, K., et al., *Study of Accident Environment during Sea Transport of Nuclear Material, Probabilistic Safety Analysis of Plutonium Transport from Europe to Japan*, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokyo, 1998
- /YAM 98b/ Yamamoto, K., et al., *Study of Accident Environment during Sea Transport of Nuclear Material, Analysis of an Engine Room Fire on a Purpose Built Ship*, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokyo, 1998



## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BE	Brennelement
CRIEPI	Central Research Institute of Electric Power Industry
CRP	Co-ordinated research project
DL	Dosisleistung
DWR	Druckwasserreaktor
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EES	Energy Equivalent Speed; dt.: energie-äquivalente-Geschwindigkeit
FS	Deutsch-Schweizerischer Fachverband für Strahlenschutz e. V.
GDV	Gesamtverbandes der deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation; engl. IAEA: International Atomic Energy Agency
ICAO	Internationale Zivillufffahrt-Organisation; engl.: International Civil Aviation Organization
IMDG Code	International Maritime Code for Dangerous Goods
IMO	International Maritime Organization, dt.: Internationale Seeschiffahrts-Organisation
IP	Industrierversandstück; engl.: industrial package
LSA	low specific activity, dt.: geringe spezifische Aktivität
MAIB	Marine Accident Investigation Branch
NRC	Nuclear Regulatory Commission
RAM	Radioactive material; dt.: radioaktives Material
SAGSTRAM	Standing Advisory Group of the Safe Transport of Radioactive Materials
SCO	Oberflächenkontaminierte Gegenstände; engl.: surface contaminated objects
SNL	Sandia National Laboratories
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea; dt.: Internationale Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See
SWR	Siedewasserreaktor
UK	United Kingdom; dt.: Vereinigtes Königreich
UNEP	United Nations Environment Programme, dt.: Umweltprogramm der Vereinten Nationen
USA	United States of America; dt.: Vereinigte Staaten von Amerika



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	Verteilung der Kollisionsbereiche bei PKW aus den Daten der GIDAS Datenbank (Hochrechnung auf das gesamte PKW-Unfallgeschehen in Deutschland) /DEK 13/ .....	39
Abb. 4.2	Anteil der aufgetretenen EES-Werte je Geschwindigkeitsklasse und ihre Summenhäufigkeit /DEK 13/ .....	40
Abb. 4.3	Verzögerungskurve (Längs- und Querbesehleunigung) beim Anprall eines PKWs auf eine starre Barriere mit 50 km/h /DEK 13/.....	41
Abb. 4.4	Abbrand eines Lasters nach einer Kollision (Quelle: DEKRA Unfalldatenbank) /DEK 13/ .....	42





## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Zusammenfassung der Versandstücktypen in den unterschiedlichen Fassungen der IAEO-Transportvorschriften /POP 13/ .....	4
Tab. 3.1	Anforderungen an Versandstücke /POP 13/ .....	8
Tab. 4.1	Eintrittswahrscheinlichkeiten nach /IAEA 01/ für verschiedene Unfallereignisse (mechanische Belastungen) .....	24
Tab. 4.2	Ergebnisse der Studie des Gesamtverbandes der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) zu Unfallfolgebränden /DEK 13/ .....	44



**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-944161-44-0**