

**Bestimmung von
Freisetzunganteilen
aus Abfallbehältern
bei Lastannahmen in
Störfallanalysen**

Bestimmung von Freisetzungsanteilen aus Abfallbehältern bei Lastannahmen in Störfallanalysen

Cornelia Richter
Martin Sogalla

November 2022

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) unter dem Förderkennzeichen CTR00784 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer.

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

Deskriptoren

Abfallbehälter, Extrapolation, Freisetzungsanteile, Skalierung, TSK

Kurzfassung

Wenn unfall- beziehungsweise störfallbedingt mechanische und/oder thermische Belastungen auf Abfallgebinde mit radioaktiven Abfällen einwirken, kann nicht immer ausgeschlossen werden, dass Radionuklide aus den Gebinden in die umliegende Atmosphäre freigesetzt werden. Im Rahmen der Systemanalyse Konrad sowie der Transportstudien Konrad (TSK) wurden für die Abfallgebinde, die im Endlager Konrad eingelagert werden dürfen, Konzepte entwickelt, um unfallbedingte Freisetzungsanteile für verschiedene Nuklidgruppen konservativ abschätzen zu können. Dazu wurden sogenannte Belastungsklassen definiert, bei denen insgesamt neun Kombinationen aus drei verschiedenen mechanischen Belastungen und drei verschiedenen thermischen Belastungen gebildet wurden. Die mechanischen Belastungen beschränken sich dabei auf Szenarien abstürzender Gebinde bei der fehlerhaften Handhabung sowie auf Transportunfälle. Die im Rahmen der Konrad-Studien maximal betrachtete mechanische Belastung entspricht dem Aufprall eines Gebindes mit einer Geschwindigkeit von 110 km/h auf ein unnachgiebiges Hindernis. Die thermischen Belastungen reichen von „kein Brand“ bis „voll umhüllendes Feuer mit einer Temperatur von 800 °C und einer Stunde Dauer“.

Im Rahmen von Störfallanalysen zu in der Schweiz verwendeten Abfallgebinden werden die Konzepte der TSK dazu verwendet, Freisetzungsanteile konservativ abzuschätzen und damit Quellterme für die radiologische Konsequenzenanalyse zu berechnen. Je nach betrachtetem Störfall stellt sich die Frage, wie die Konzepte der TSK (der „TSK-Ansatz“) auf andere Gebindetypen und mechanische und/oder thermische Belastungen übertragen werden können.

Im vorliegenden Dokument werden die Aspekte, die bei der Anwendung und Übertragung des TSK-Ansatzes berücksichtigt werden müssen, zusammenfassend dargestellt. Dies beinhaltet insbesondere eine mit dem TSK-Ansatz konsistente Methodik zur konservativen Abschätzung der Freisetzungsanteile bei thermischen und erhöhten mechanischen Belastungen sowie variablen Massen und Volumina von Abfallgebinden.

Abstract

In case of mechanical and/or thermal impacts on radioactive waste packages caused by accidents or incidents, it cannot always be excluded that radionuclides are released into the surrounding atmosphere. Within the framework of the "Konrad System Analysis" and the "Transportstudie Konrad" (TSK; study on numerous aspects concerning the expected transports of radioactive waste to the Konrad repository), concepts were developed to conservatively estimate release fractions for different nuclide groups due to accidents involving radioactive waste packages. These estimates concentrated on the waste packages that are allowed to be emplaced in the Konrad repository. For this purpose, so-called load classes were defined, in which a total of nine combinations of three different mechanical loads and three different thermal loads were formed. The mechanical loads are limited to scenarios involving the handling of falling containers and transport accidents. The maximum mechanical load considered in the Konrad studies corresponds to the collision of a container traveling with a speed of 110 km/h with a rigid barrier. The thermal loads range from "no fire" to "fully enveloping fire with a temperature of 800 °C and a duration of one hour".

Within the framework of accident analyses for waste packages used in Switzerland, the concepts of the TSK are used to conservatively estimate release fractions and thus to calculate source terms for the radiological consequence analysis. Depending on the incident under consideration, the question arises how the TSK concepts (the "TSK-Ansatz") can be transferred to other container types and mechanical and/or thermal loads.

In the present document, aspects that must be considered for the application and transfer of the TSK-Ansatz are summarized. This includes, in particular, a methodology consistent with the TSK-Ansatz for the conservative estimation of the release fractions at thermal and elevated mechanical loads as well as variable masses and volumes of waste packages.

Inhalt

	Kurzfassung	I
	Abstract	III
1	Einleitung	1
2	Bestimmung von Freisetzungsteilen mit dem „TSK-Ansatz“	3
2.1	TSK-Belastungsklassen.....	3
2.2	Abfallgebindegruppen	4
2.3	Die Freisetzungsteile der TSK 09.....	9
2.4	Aktualisierte Freisetzungsteile, GRS-482, Oktober 2017	10
2.5	Freisetzungsteile für gasförmigen Anteil in radioaktivem Abfall.....	10
2.6	Bisheriges Verfahren zur Skalierung und Extrapolation von Freisetzungsteilen.....	16
2.6.1	Übertragung zu anderen Abfallvolumina und Abfallmassen	16
2.6.2	Extrapolation zu höheren spezifischen mechanischen Energieeinträgen (bisheriges Verfahren)	17
2.7	Aktualisiertes Verfahren zur konsistenten Skalierung und Extrapolation von Freisetzungsteilen	19
2.7.1	Skalierung von Freisetzungsteilen auf abweichende Gebindemassen und Gebindevolumina	20
2.7.2	Extrapolation zu höheren spezifischen mechanischen Energieeinträgen und zusätzlichen thermischen Belastungen	22
3	Ablaufschema und Beispielrechnung	25
3.1	Weiteres Ablaufschema für mechanische Belastungen kleiner als 467 J/kg.....	26
3.2	Weiteres Ablaufschema für mechanische Belastungen größer als 467 J/kg und damit einer Extrapolation der FA	27
4	Literaturverzeichnis	31
	Abkürzungsverzeichnis	35

	Tabellenverzeichnis.....	37
A	Anhang: Freisetzungen aus thermischen Belastungen.....	39
A.1	Kleine Gebinde	43
A.2	Verbrennen.....	44
A.3	Pyrolyse (über 300 °C)	44
A.4	Mitriss beim Verdampfen von Wasser (über 100 °C)	44
A.5	Sublimation, Verdampfen.....	45
A.6	Zuordnung der thermischen Freisetzungsmechanismen zu den APG.....	46
B	Anhang: Abschätzung des mechanischen Energieeintrages bei Gebindestapeln.....	47
B.1	Transportunfall.....	47
B.2	Aufprall einer bewegten Masse auf ein einzelnes Gebinde	47
B.3	Aufprall einer bewegten Masse auf einen Gebindestapel.....	48

1 Einleitung

Im Rahmen von Störfallanalysen, in denen mechanische und thermische Belastungen auf Abfallgebinde mit radioaktiven Abfällen betrachtet werden, dienen Ansätze der Transportstudien Konrad /GRS 10 und darin zitierte Vorgängerstudien/ (TSK 09) sowie der Vertiefung zur Transportstudie Konrad /GRS 13/ häufig als Grundlage zur Abschätzung von Freisetzunganteilen¹ (FA). Im vorliegenden Dokument werden dafür sämtliche Aspekte zusammengefasst (Kapitel 2).

Freisetzungen aus Abfallgebinden, die für den Transport zum und die Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind, können nur bei Transportunfällen und Fehlern bei der Handhabung (Be- und Entladen, Ein- und Umlagerung) auftreten. Die Annahmen der TSK 09 decken die für Transportunfälle zu erwartenden Lastannahmen ab. Sowohl die mechanischen Belastungen als auch die thermischen Belastungen werden dabei in jeweils drei unterschiedliche Belastungsstufen eingeteilt. Aus der Kombination dieser mechanischen und thermischen Belastungsstufen werden insgesamt neun unterschiedliche Belastungsklassen (BK) definiert (siehe Abschnitt 2.1).

Neben den Unfallbelastungen werden die FA auch durch die Beschaffenheit des Abfalls beeinflusst. Der TSK-Ansatz klassiert die Abfallgebinde daher in sogenannte Abfallgebindegruppen (AGG, siehe Abschnitt 2.2). Tabellen für Freisetzunganteile der TSK 09 sind in Abschnitt 2.3 zusammengestellt. Im Rahmen eines Eigenforschungsvorhabens (Vorhaben 3614R03343 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) hat die GRS eine Aktualisierung der TSK-Freisetzungsanteile veröffentlicht /GRS 17/, die den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik darstellt. Diese Werte sind in Abschnitt 2.4 tabellarisch wiedergegeben.

Sollen die (aktualisierten) FA der TSK für andere Gebindetypen mit anderen Massen oder Volumina und für höhere mechanische Belastungen verwendet² werden, müssen verschiedene Anpassungs- und Extrapolationsschritte durchgeführt werden. Die

¹ Bei Freisetzunganteilen handelt es sich um nuklidspezifische relative Anteile des radioaktiven Inventars, die bei einem Unfall als luftgetragenes Aerosol (mit einem aerodynamischen Äquivalentdurchmesser AED kleiner 100 µm) oder als Gas aus dem Abfallgebinde austreten.

² Die maximal im Rahmen der TSK 09 angenommenen mechanischen Belastungen können bei Störfallanalysen deutlich übertroffen werden. Eine konservative Abschätzung der FA mittels Extrapolation wird für diese Fälle angestrebt.

bisherige Methodik wird in Abschnitt 0 vorgestellt. Bei dieser bisherigen Methodik wurden allerdings die Beträge der Freisetzung aus der mechanischen Belastung nur inkonsistent³ berücksichtigt. Insbesondere bei kleinen Gebinden und hohen spezifischen mechanischen Energieeinträgen kombiniert mit thermischen Belastungen führt diese Inkonsistenz zu kleineren Freisetzungsanteilen bei den sonstigen Nukliden im Vergleich zu einer konsistenten Berücksichtigung.

In Abschnitt 2.7 wird daher eine konsistente Methodik für die Skalierung und für die Extrapolation zu höheren mechanischen Energieeinträgen vorgestellt. Eine Beispielrechnung dazu wird in Kapitel 3 präsentiert.

In den Anhängen finden sich zusätzlich Erläuterungen zu den Freisetzungsprozessen, die in der TSK bei thermischen Belastungen angenommen werden (Anhang A) sowie Überlegungen und Näherungsmethoden, um die mechanischen Belastungen einzelner Gebinde bei verschiedenen Szenarien abschätzen zu können (Anhang B).

³ Die Methodik ging davon aus, dass bei vorliegenden thermischen Belastungen die Freisetzung der kleinen Aerosole (zur Definition siehe Abschnitt 2.3) durch die thermischen Freisetzungsprozesse dominiert wird, also um Größenordnungen höher ist als die durch die mechanischen Belastungen bedingten Freisetzungen der kleinen Aerosole. Dies ist bei den Gebindetypen und Belastungsannahmen der TSK deutlich der Fall. Die Extrapolationsmethode berücksichtigte daher nur bei den großen Aerosolen die mechanische Belastung explizit, bei den kleinen Aerosolen wurde sie (zusätzliche thermische Belastungen vorausgesetzt) vernachlässigt.

2 Bestimmung von Freisetzungsteilen mit dem „TSK-Ansatz“

2.1 TSK-Belastungsklassen

In den Transportstudien Konrad /GRS 91a/, /GRS 10/ wurden die mechanischen und thermischen Belastungen in sogenannte Belastungsklassen eingeteilt. Dabei wird zwischen drei unterschiedlichen thermischen Belastungen (kein Brand, voll umhüllendes Feuer mit einer Temperatur von 800 °C und einer halben Stunde Dauer sowie ein gleichartiges Feuer von einer Stunde Dauer) unterschieden. Bei den mechanischen Belastungen wird jeweils der Aufprall eines Abfallgebundes auf ein unnachgiebiges Hindernis betrachtet und ebenfalls zwischen drei unterschiedlichen mechanischen Belastungen unterschieden, die jeweils an einer maximalen Aufprallgeschwindigkeit ausgerichtet sind. Maßgeblich für die mechanische Belastung ist dabei der spezifische mechanische Energieeintrag, also der Energieeintrag, der pro Gebindemasse M für die Deformation und Zerstörung des Gebindes zur Verfügung steht. Die geringste mechanische Belastungsstufe beinhaltet Unfälle, bei denen das Abfallgebände mit einer Geschwindigkeit v von maximal 35 km/h auf das Hindernis prallt. Dies entspricht einem freien Fall aus bis zu 4,8 m Höhe h auf einen unnachgiebigen Boden bzw. einem spezifischen mechanischen Energieeintrag ($E_{kin}/M = 0,5 \cdot v^2$ bzw. beim freien Fall $E_{pot}/M = g \cdot h$) von maximal 47,3 J/kg. Als nächsthöhere mechanische Belastungsstufe wird ein Aufprall mit bis zu 80 km/h (maximale Fallhöhe 25,2 m, spezifischer Energieeintrag bis zu 246,9 J/kg) angesetzt. Die höchste, in den Transportstudien betrachtete mechanische Belastungsstufe umfasst Unfälle mit einer Aufprallgeschwindigkeit von bis zu 110 km/h (maximale Fallhöhe 47,6 m, spezifischer mechanischer Energieeintrag bis 466,8 J/kg). Höhere Aufprallgeschwindigkeiten werden in den Transportstudien nicht betrachtet, da davon ausgegangen werden kann, dass Güterzüge bzw. LKW nicht schneller fahren. Auch Zusammenstöße mit anderen Fahrzeugen, bei denen unter Umständen höhere Aufprallgeschwindigkeiten vorkommen könnten, sind durch diesen höchsten angenommen spezifischen mechanischen Energieeintrag weitestgehend abgedeckt, da andere Fahrzeuge keine unnachgiebigen Hindernisse darstellen, daher bei einem Zusammenstoß ebenfalls verformt oder zerstört werden und somit nicht mehr die gesamte mechanische Energie zur Zerstörung des Abfallgebundes zur Verfügung steht.

Aus der Kombination der drei thermischen Belastungsstufen und der drei mechanischen Belastungsstufen ergeben sich insgesamt neun sogenannte Belastungsklassen (BK).

Diese sind in Tab. 2.1 zusammengestellt. Für die mechanischen Belastungen sind dabei die vier gebräuchlichen, gleichwertigen Maßzahlen (Aufprallgeschwindigkeit in km/h bzw. m/s, Fallhöhe beim freien Fall und maximaler spezifischer Energieeintrag) angegeben.

Tab. 2.1 Nummerierung der Belastungsklassen in Abhängigkeit von mechanischer und thermischer Belastungsstufe

mechanische Belastungsstufen				thermische Belastungsstufen		
maximale Aufprallgeschwindigkeit des Abfallgebindes auf unnachgiebiges Hindernis	maximale Fallhöhe des Abfallgebindes auf unnachgiebigen Boden	maximaler spezifischer mechanischer Energieeintrag		kein Brand	halbe Stunde Brand	eine Stunde Brand
35 km/h	9,7 m/s	4,8 m	47,3 J/kg	BK 1	BK 2	BK 3
80 km/h	22,2 m/s	25,2 m	246,9 J/kg	BK 4	BK 5	BK 6
110 km/h	30,6 m/s	47,6 m	466,8 J/kg	BK 7	BK 8	BK 9

2.2 Abfallgebindegruppen

Im Rahmen der TSK 09 werden die Freisetzungsanteile jeweils für sogenannte Abfallgebindegruppen definiert. Dabei orientiert sich die Zuordnung von Abfallgebinden zu diesen AGG an der Art des Abfalls und dessen Konditionierung sowie der Art der Verpackung. Grundlage dafür, welche Abfallarten, Konditionierungen und Verpackungen dabei überhaupt berücksichtigt werden, bilden die Endlagerbedingungen für die Einlagerung in das Endlager Konrad /KUG 17/, in denen, wie im Folgenden kurz dargestellt, Abfallproduktgruppen (APG) und Abfallbehälterklassen (ABK) definiert wurden. Detailliertere Beschreibungen finden sich in /KUG 17/ Kapitel 4 (zu APG) bzw. 5 (zu ABK).

Bei den Abfallarten, die aus den radioaktiven Rohabfällen erzeugt werden, wird in den Endlagerungsbedingungen zwischen sechs APG unterschieden. Diese Abfallprodukte müssen allgemeinen Grundanforderungen genügen: Neben Anforderungen zu den Mengen bzw. spezifischen Aktivitäten von bestimmten Nukliden und insbesondere auch spaltbarem Material werden auch Bedingungen an die weiteren mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften gestellt. So müssen die Abfallprodukte beispielsweise in fester Form vorliegen, dürfen nicht faulen, gären, selbstentzündlich oder explosiv sein und dürfen (bis auf nicht vermeidbare Restgehalte) weder Flüssigkeiten noch Gase in Ampullen, Flaschen oder sonstigen Behältern enthalten /KUG 17/. Zu den einzelnen Abfallproduktgruppen werden in den Endlagerbedingungen die folgenden Angaben gemacht:

- APG 1: Alle Abfälle, die den Grundanforderungen genügen, können dieser Abfallproduktgruppe zugeordnet werden.
(z. B. Bitumen- und Kunststoffprodukte)
- APG 2: Über die Grundanforderungen hinaus muss gewährleistet sein, dass brennbare Abfallstoffe mit einem Schmelzpunkt unter 300 °C entweder so verarbeitet sind, dass sie bei thermischer Belastung nicht aus dem Abfallprodukt austreten können oder dass ihr Anteil nicht mehr als 1 % an Aktivität des Abfallproduktes aufweist.
(z. B. Feststoffe)
- APG 3: Neben den Bedingungen der Grundanforderung muss hier gewährleistet sein, dass das Abfallprodukt nur aus Metallteilen bzw. aus Werkstoffen von Einbauteilen eines Reaktorkerns außer Graphit besteht.
(z. B. metallische Feststoffe)
- APG 4: Über die Grundanforderungen hinaus muss gewährleistet sein, dass der radioaktive Abfall mit einem Pressdruck von mindestens 30 MPa formstabil kompaktiert ist. Die Presslinge können auch in Innenbehälter verpackt und/oder Resthohlräume im Abfallbehälter mit inaktivem Zement/Beton verfüllt werden.
- APG 5: Neben den Grundanforderungen muss gewährleistet sein, dass der radioaktive Abfall in Zementstein oder Beton fixiert ist. Die Fixierung muss so ausgeführt sein, dass bei eingebundenen oder verfestigten radioaktiven Abfällen (z. B. Aschen, Pulvern oder wässrigen Konzentraten) die Aktivität gleichmäßig und vollständig im Zementstein oder Beton verteilt ist bzw. bei vergossenen radioaktiven Abfällen (z. B. Schrott) die Aktivität möglichst gleichmäßig im Abfallprodukt verteilt ist, und dass die Druckfestigkeit des Abfallproduktes mindestens 10 N/mm² beträgt.
(z. B. zementierte Abfälle)
- APG 6: Das Abfallprodukt muss die Grundanforderungen erfüllen sowie aus einem festen Körper mit einer Druckfestigkeit von mindestens 10 N/mm² bestehen und nicht brennbar sein.
(z. B. Konzentrate)

Bei den Abfallbehältern wird in den Endlagerbedingungen zwischen zwei verschiedenen Abfallbehälterklassen (ABK) unterschieden. Für beide ABK gelten allgemeine Grundanforderungen. Diese geben unter anderem die Außenabmessungen und Bruttovolumina vor, siehe Tab. 2.2. Die Grundanforderungen geben zudem vor, dass die Behälter bis zu einer Höhe von 6 m gestapelt werden können müssen, ohne dass ihre spezifizierte Dichtheit oder Integrität gefährdet ist. Wenn die Behälter aus Stahlblech bestehen, müssen sie laut Grundanforderungen innen und außen korrosionsgeschützt sein. Zudem wird gefordert, dass die Abfallbehälter bei der Anlieferung weder mechanisch noch korrosiv beschädigt sein dürfen.

Neben den Grundanforderungen an Abfallbehälter muss ein Behälter der ABK I so ausgelegt sein, dass bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit⁴ von 4 m/s die Integrität soweit erhalten bleibt, dass bei einer thermischen Belastung entsprechend der BK 3, 6 oder 9 der Sauerstoffzutritt in den Abfallbehälter zum Abfallprodukt soweit eingeschränkt ist, dass brennbare Abfallprodukte mit einem Schmelzpunkt über 300 °C nicht offen abbrennen, sondern lediglich pyrolysieren können. Für Behälter der ABK II wird zusätzlich zu den Grundanforderungen verlangt, dass nach einem Fall aus 5 m Höhe auf einen unachgiebigen Untergrund die Gesamtleckrate (bezogen auf Standardbedingungen wie bei der Dichtheitsprüfung nach der Vakuummethode) $1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ nicht überschreitet. Bei „einem Schadensfeuer mit einer Temperatur von 800 °C während einer Stunde“ /KUG 17/ muss die Gesamtleckrate eines ABK II Behälters kleiner als $1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ sein und die Stoffmenge, die während des Feuers und in den darauffolgenden 24 Stunden der Abkühlphase austritt, darf 1 mol nicht überschreiten.

⁴ In /KUG 17/ wird in Kapitel 5.2 lediglich der Begriff Aufprallgeschwindigkeit bei der Beschreibung zur ABK I verwendet. Gemeint ist hier vermutlich die Aufprallgeschwindigkeit beim Aufprall auf ein unnachgiebiges Hindernis, da dies die konservative Annahme für den Energieeintrag bzw. die mechanische Belastung des Abfallbehälters darstellt.

Tab. 2.2 Behältergrundtypen für die Verpackung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, Tabelle 1 aus Anhang 1 der Endlagerungsbedingungen Konrad /KUG 17/

Nr.	Bezeichnung	Außenabmessungen			
		Länge / Durchmesser mm	Breite mm	Höhe mm	Bruttovolumen m ³
1	Betonbehälter Typ I	∅ 1060	—	1370 ¹⁾	1,2
2	Betonbehälter Typ II	∅ 1060	—	1510 ²⁾	1,3
2a	Betonbehälter Typ II ummantelt	∅ 1060	—	1510	1,3
3	Gussbehälter Typ I	∅ 900	—	1150	0,7
4	Gussbehälter Typ II	∅ 1060	—	1500	1,3
4a	Gussbehälter Typ II/KfK	∅ 1060	—	1370	1,2
5	Gussbehälter Typ III	∅ 1000	—	1240	1,0
6	Container Typ I	1600	1700	1450	3,9
6a	Container Typ I/KfK	1600	1700	1400	3,8
7	Container Typ II	1600	1700	1700	4,6
8	Container Typ III	3000	1700	1700	8,7
9	Container Typ IV	3000	1700	1450	7,4
9a	Container Typ IV/KfK	3000	1700	1400	7,14
10	Container Typ V	3200	2000	1700	10,9
11	Container Typ VI	1600	2000	1700	5,4
<p>¹⁾ Höhe 1370 mm + Lasche von 90 mm = 1460 mm</p> <p>²⁾ Höhe 1510 mm + Lasche von 90 mm = 1600 mm</p>					
<p>Containerwerkstoffe sind z. B. Stahlblech, armerter Beton oder Gusswerkstoff.</p>					

Um als störfallfest verpackt zu gelten, wird für Abfallprodukte in ABK I-Behältern zusätzlich gefordert, dass der radioaktive Abfall entweder formstabil fixiert oder in einen Innenbehälter verpackt ist, der formstabil vergossen ist und diese Formstabilität auch bei einem Fall aus 5 m Höhe auf ein unnachgiebiges Hindernis (rund 10 m/s Aufprallgeschwindigkeit) erhalten bleibt. Darüber hinaus ist das Abfallprodukt allseitig von einer inaktiven Schicht mit einem hohen Wärmeleitwiderstand von $0,1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ umgeben, die bei einem Aufprall mit 4 m/s auf einen unnachgiebigen Untergrund intakt bleibt.⁵ Für Abfälle in ABK II-Behältern wird zusätzlich gefordert, dass bei formstabil fixierten und in Innenbehältern verpackten radioaktiven Abfällen die Integrität der Innenbehälter nach einem Fall aus 5 m Höhe auf eine unnachgiebige Unterlage erhalten bleibt und dass die Wandung der Verpackung bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s einen Wärmeleitwiderstand wie bei der ABK I von mindestens $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ besitzt, oder „bei einem Schadensfeuer mit einer Temperatur von $800 \text{ }^\circ\text{C}$ während einer Stunde sichergestellt ist, dass eine radiologisch relevante Freisetzung radioaktiver Stoffe während des Brandes und einer Abkühlphase von 24 Stunden nicht erfolgt“ /KUG 17/. Zur Definition einer „radiologisch relevanten Freisetzung“ wird dabei auf Abschnitt 7.3.3 aus /STE 10/ verwiesen, wobei der dort definierte Summenwert⁶ für einen störfallfesten ABK II-Behälter kleiner als 0,1 sein muss.

Wie eingangs zu Abschnitt 2.2 bereits erwähnt, wurden aus den Abfallproduktgruppen und Abfallbehälterklassen, die für das Endlager Konrad zugelassenen sind, Abfallgebindergruppen gebildet. Seit der Veröffentlichung der Transportstudie Konrad 2009 /GRS 10/ sind diese AGG wie in Tab. 2.3 angegeben definiert. Zusätzlich zu den Informationen aus /GRS 10/ wird in dieser Tabelle auch eine explizite Zuordnung der APG zu den AGG präsentiert.

⁵ Die inaktive, umhüllende Schicht darf aber bei einer größeren Aufprallgeschwindigkeit kaputt gehen und somit einen Teil der Stoßenergie aufnehmen.

⁶ Der in /STE 10/, Kapitel 7.3.3, definierte Summenwert stellt eine für das Endlager Konrad spezifizierte Maßzahl dar, die zum einen berücksichtigt, wie ein Gebinde im Rahmen der Einlagerung gehandhabt wird (alleine oder mit anderen Gebinden auf einer Transportpalette), und zum anderen nuklidspezifische Verhältnisse zwischen den in /STE 10/ tabellierten nuklidspezifischen zulässigen Freisetzungen.

Tab. 2.3 Definition der TSK-Abfallgebindegruppen mit Zuordnung der APG

AGG	Behältertyp	ABK	Abfallart	APG
1	Stahlblechcontainer	I	Brennbare, unfixierte Abfälle	1
2	Stahlblechcontainer oder Betonbehälter	I	Unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nicht metallische Abfälle (einschließlich Verdampferkonzentraten)	2, 6
3	Stahlblechcontainer oder Betonbehälter	I	Metallische Abfälle	3
4	Stahlblechcontainer oder Betonbehälter	I	Kompaktierte Abfälle	4
5	Stahlblechcontainer	I	Zementfixierte Abfälle	5
6	Betonbehälter	I	Brennbare, unfixierte Abfälle	1-4
7	Betonbehälter	I	Zementfixierte Abfälle	5
8	Gussbehälter	II	Abfälle in Gussbehältern	1-6

2.3 Die Freisetzunganteile der TSK 09

Die Freisetzunganteile werden in der TSK für einige Nuklide (H-3, C-14 und Halogene) separat angegeben, da bei diesen von einer erhöhten Flüchtigkeit bei thermischen Belastungen ausgegangen wird. Für alle anderen „sonstigen Nuklide“ werden einheitliche FA abhängig von AGG und BK größenabhängig definiert. Für gasförmig vorliegende radioaktive Abfälle sind die FA der TSK nicht ohne weitere Überlegungen anwendbar. Was bei vorliegenden gasförmigen radioaktiven Abfällen zusätzlich zu beachten ist, wird in Abschnitt 2.5 erläutert.

Die angegebenen FA geben dabei jeweils den Anteil der freigesetzten Nuklide vom ursprünglich im gesamten Gebinde befindlichen Inventar an, wobei verschiedene Größenklassen von Aerosolen bzw. gasförmige Freisetzungen unterschieden werden. Größere Bruchstücke des Abfalls, die gegebenenfalls zusätzlich aus dem ursprünglichen Abfallgebinde austreten, werden bei diesen FA also nicht angegeben. Als relevant werden lediglich die luftgetragenen Anteile betrachtet, da diese potentiell weit in die Umwelt verbreitet werden und somit zu einer Strahlenbelastung der Bevölkerung führen könnten. Bei den luftgetragenen Freisetzungen wird zwischen zwei Größenklassen unterschieden: Gase bzw. kleine, lungengängige Aerosole mit einem aerodynamischen Äquivalentdurchmesser (AED) bis zu 10 µm sowie große Aerosole mit einem AED zwischen 10 µm und 100 µm.

Die FA der TSK 09 inklusive kleinerer Korrekturen sind in Tab. 2.4 für die sonstigen Nuklide sowie in Tab. 2.5 für H-3, C-14 und Halogene zusammengestellt.

2.4 Aktualisierte Freisetzunganteile, GRS-482, Oktober 2017

Im Oktober 2017 veröffentlichte die GRS im Rahmen des Forschungsvorhabens „Überprüfung von Unfallstatistiken und Freisetzunganteilen sowie Weiterentwicklung von Modellsystemen zur Bewertung von Sicherheitsniveaus bei der Beförderung radioaktiver Stoffe“ (3614R03343) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) die Ergebnisse ihrer Überprüfung des unfallbedingten Freisetzungsverhaltens bei der Beförderung radioaktiver Stoffe /GRS 17/. Die dort veröffentlichten Werte stellen den aktuellen Stand der in Deutschland im Rahmen von Untersuchungen zu Transportunfällen radioaktiver Stoffe zu verwendenden Freisetzungsteile dar. Die aktuellen Werte für die sonstigen Nuklide sind in Tab. 2.6 und die für H-3, C-14 und Halogene in Tab. 2.7 wiedergegeben.

2.5 Freisetzungsteile für gasförmigen Anteil in radioaktivem Abfall

In Abschnitt 2.2 wurde bereits erwähnt, dass gemäß den Einlagerungsbedingungen /KUG 17/ Abfälle, die im Endlager Konrad eingelagert werden sollen, in fester Form vorliegen müssen und keine gasförmigen radioaktiven Abfälle in Ampullen, Flaschen oder sonstigen Behältern beinhalten dürfen.

Bei der Übertragung von TSK-Freisetzungsteilen muss daher überprüft werden, ob in den zu betrachtenden Abfallgebänden gasförmige radioaktive Stoffe vorkommen.

Sollte dies der Fall sein, dann gelten folgende Überlegungen für die zu verwendenden Freisetzungsteile:

- a) Bei gasförmigen radioaktiven Abfällen in Ampullen, Flaschen oder sonstigen Behältern muss überprüft werden, ob diese in Kombination mit eventuell vorhandenen weiteren Umverpackungen der zu veranschlagenden mechanischen und/oder thermischen Belastung standhalten. Kann die Dichtheit des Abfallgebändes nicht nachgewiesen werden, ist ein Freisetzungsteil von 1 anzusetzen. Ohne einen Nachweis wird also bereits bei rein mechanischen Belastungen der BK 1 eine komplette Freisetzung der gasförmigen radioaktiven Abfälle angesetzt.
- b) Handelt es sich bei den gasförmigen radioaktiven Abfällen um Edelgase, die als Zerfallsprodukte aus den ursprünglich verpackten radioaktiven Abfällen entstehen, wird für eine Näherung der FA davon ausgegangen, dass sich die

Aktivität des radioaktiven Edelgases im radioaktiven Zerfallsgleichgewicht mit dem ursprünglich verpackten Ausgangsnuklid befindet. Die Freisetzung des radioaktiven Edelgases wird dann mit dem für dieses Ausgangsnuklid maximal zu veranschlagenden Freisetzungsteiles bei den jeweils anzunehmenden mechanischen und/oder thermischen Belastungen abgeschätzt. Dieser maximal für nicht gasförmig vorliegende Nuklide anzusetzende Freisetzungsteil ist der FA für Halogene.

Tab. 2.4 Partikelgrößenabhängige Freisetzunganteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallbindegruppe aus /GRS 13/ mit farblich gekennzeichneten Korrekturen bei AGG 5 und AGG 7 in BK 7 bis 9 für die großen Partikel (zu diesen Korrekturen siehe /GRS 17/)

Belastungsklasse	AED	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	0 - 10 µm	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$			
BK 2	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$			0
BK 3	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$			0
BK 4	0 - 10 µm	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	
BK 5	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 6	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 7	0 - 10 µm	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
	10 - 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0
BK 8	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
	10 - 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0
BK 9	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	10 - 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0

Tab. 2.5 Freisetzungsanteile für H-3, C-14 und Halogene (AED 0 - 10 µm) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe (w. s. N.: wie sonstige Nuklide) aus /GRS 13/. FA für große Aerosole wie bei sonstigen Nukliden.

Belastungsklasse	Radionuklid	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	H-3	w. s. N.	0	0	0				
	C-14	w. s. N.	0	0	0				
	Halogene	w. s. N.	0	0	0				
BK 2	H-3	1	1	1	1	$6,0 \cdot 10^{-2}$	0	0	$7,3 \cdot 10^{-7}$
	C-14	1	1	1	1	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0	0	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	Halogene	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	0	0	$1,6 \cdot 10^{-4}$
BK 3	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	0	0	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	C-14	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1	1	$6,0 \cdot 10^{-3}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	1	$4,0 \cdot 10^{-2}$
BK 4	H-3	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	0				
	C-14	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	0				
	Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	0				
BK 5	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	1	$7,3 \cdot 10^{-7}$
	C-14	1	1	1	1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	1	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	1	$1,6 \cdot 10^{-4}$
BK 6	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	1	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	C-14	1	1	1	1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	1	1	$6,0 \cdot 10^{-3}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	1	$4,0 \cdot 10^{-2}$
BK 7	H-3	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	C-14	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
BK 8	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	1	$7,3 \cdot 10^{-7}$
	C-14	1	1	1	1	$2,8 \cdot 10^{-3}$	1	1	$2,2 \cdot 10^{-4}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$
BK 9	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	1	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	C-14	1	1	1	1	$2,8 \cdot 10^{-3}$	1	1	1
	Halogene	1	1	1	1	1	1	1	1

Tab. 2.6 Partikelgrößenabhängige Freisetzunganteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe nach /GRS 17/

Belastungsklasse	AED	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	0 - 10 µm	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 2	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 3	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 4	0 - 10 µm	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 5	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 6	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	10 - 100 µm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 7	0 - 10 µm	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
	10 - 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0
BK 8	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
	10 - 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0
BK 9	0 - 10 µm	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	10 - 100 µm	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0

Tab. 2.7 Freisetzungsanteile für H-3, C-14 und Halogene (AED 0 - 10 µm) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe (w. s. N.: wie sonstige Nuklide) aus /GRS 17/. FA für große Aerosole wie bei sonstigen Nukliden.

Belastungsklasse	Radionuklid	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	H-3	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	C-14	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
BK 2	H-3	1	1	1	1	$6,0 \cdot 10^{-2}$	0	0	$7,3 \cdot 10^{-7}$
	C-14	1	1	1	1	w. s. N.	0	w. s. N.	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	Halogene	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	0	0	$1,6 \cdot 10^{-4}$
BK 3	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	0	0	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	C-14	1	1	1	1	w. s. N.	$5,0 \cdot 10^{-1}$	w. s. N.	$6,0 \cdot 10^{-3}$
	Halogene	1	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
BK 4	H-3	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	C-14	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
BK 5	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$
	C-14	1	1	1	1	w. s. N.	1	w. s. N.	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
BK 6	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	C-14	1	1	1	1	w. s. N.	1	w. s. N.	$6,0 \cdot 10^{-3}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
BK 7	H-3	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	C-14	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
	Halogene	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.	w. s. N.				
BK 8	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$
	C-14	1	1	1	1	w. s. N.	1	w. s. N.	$5,0 \cdot 10^{-1}$
	Halogene	1	1	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$
BK 9	H-3	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$
	C-14	1	1	1	1	w. s. N.	1	w. s. N.	1
	Halogene	1	1	1	1	1	1	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1

2.6 Bisheriges Verfahren zur Skalierung und Extrapolation von Freisetzungsteilen

2.6.1 Übertragung zu anderen Abfallvolumina und Abfallmassen

Wie im Abschnitt 2.2 zusammengestellt, kann für die AGG der TSK 09 von relativ großen und schweren Gebinden, die für die Einlagerung in das Endlager Konrad vorbereitet sind, ausgegangen werden. Sollen die Freisetzungsteile der TSK auf andere Abfallgebände übertragen werden, müssen diese Abfallgebände zunächst den Abfallgebändegruppen der TSK zugeordnet werden. Als nächstes folgt die Anpassung der Freisetzungsteile an die Gebindemasse bzw. an das Gebindevolumen. Die Grundlage dieser Anpassungen ist das unterschiedliche Freisetzungsverhalten bei einer mechanischen Belastung in Abhängigkeit von der Konditionierung /GRS 13/. Die aus rein mechanischen Belastungen resultierenden FA der BK 1, 4 und 7 für kleine Aerosole bzw. Gase und große Aerosole müssen also auf die vorliegenden, abweichenden Gebindemassen bzw. -volumen skaliert werden. Dies gilt sowohl für die FA der sonstigen Nuklide als auch für die von H-3, C-14 und Halogenen, da diese bei rein mechanischen Belastungen das gleiche Freisetzungsverhalten zeigen wie die sonstigen Nuklide. Die FA der großen Aerosole werden auch bei den BK 2, 3 (entsprechend BK 1), BK 5, 6 (entsprechend BK 4) und BK 8, 9 (entsprechend BK 7) durch die mechanische Belastung bestimmt und mittels der Skalierung angepasst (sowohl für sonstige Nuklide als auch für H-3, C-14 und Halogene).

Für Gebinde, die den AGG 1, 2, 3, 4 und 6 zugeordnet werden, erfolgt eine Skalierung der durch die mechanischen Belastungen dominierten FA, die im Rahmen der TSK 09 für einen Stahlcontainer Typ IV mit einem Volumen $V_0 = 7,4 \text{ m}^3$ hergeleitet wurden (zum Hintergrund dieser Wahl von V_0 siehe /GRS 13/, Abschnitt 4.2.2), anhand des Gebindevolumens V :

$$FA(V) = FA(V_0) \cdot (V_0/V)^{2/3} \quad \text{mit } V_0 = 7,4 \text{ m}^3$$

Für Gebinde der AGG 8 (Abfall in Gussbehältern) wird bei rein mechanischen Belastungen erst mit der BK 7 angenommen, dass der Behälter im Bereich des Deckels nicht mehr komplett dicht ist. Abhängigkeiten der Freisetzungsteile von Gebindevolumen oder -masse bestehen dabei nicht. Sobald bei höheren spezifischen mechanischen Belastungen als der maximal in der TSK 09 betrachteten spezifischen mechanischen Belastung (siehe Tab. 2.1) nicht mehr von der Integrität des Gussbehälters ausgegangen

werden kann, wird für Gebinde der AGG8 das Abfallgebilde statt der AGG 8 der AGG 1 zugeordnet und eine Skalierung an das Gebindevolumen vorgenommen.

Für Gebinde, die der AGG 5 oder 7 zugeordnet sind (zementfixierter und damit sprödbrechender Abfall), erfolgt eine Skalierung anhand der Gebindemasse M :

$$FA(M) = FA(M_0) \cdot (M_0/M)^{0,43} \quad \text{mit } M_0 = 11000 \text{ kg}$$

2.6.2 Extrapolation zu höheren spezifischen mechanischen Energieeinträgen (bisheriges Verfahren)

Bei höheren spezifischen mechanischen Energieeinträgen als denen der BK 7, also größer als 467 J/kg, erfolgt eine lineare Extrapolation der mechanisch bedingten FA mit dem spezifischen mechanischen Energieeintrag $spezE$. Als Stützstellen für die Extrapolation werden, wenn kein zusätzlicher Brand angenommen wird, die auf das vorliegende Volumen bzw. die vorliegende Masse skalierten FA der BK 4 und BK 7 verwendet. Dabei werden die FA der kleinen Aerosole, der großen Aerosole, von H-3, C-14 und der Halogene jeweils gesondert extrapoliert.

$$FA(spezE) = FA(spezE_{BK7}) + \frac{FA(spezE_{BK7}) - FA(spezE_{BK4})}{spezE_{BK7} - spezE_{BK4}} (spezE - spezE_{BK7})$$

$spezE_{BK4}$ und $spezE_{BK7}$ entsprechen dabei jeweils dem maximalen spezifischen mechanischen Energieeintrag der jeweiligen BK (vgl. Tab. 2.1). Bei einem halbstündigen Brand werden als Stützstellen die FA der BK 5 und 8 und bei einem einstündigen Brand die FA der BK 6 und 9 verwendet.

Die Methode wurde bisher ausschließlich mit den FA aus TSK 09 (Tab. 2.4 und Tab. 2.5) verwendet.

Bei der Extrapolation der FA für hohe mechanische Belastungen, bei dem auch ein bis zu halbstündiger Brand angenommen werden muss und somit bei den mechanisch belasteten Gebinden von den (skalierten) Stützstellen BK 5 und BK 8 ausgegangen wird, führt die Extrapolation bei den FA der kleinen Aerosole der sonstigen Nuklide bei der AGG 1, 2 und 6 zu keiner Erhöhung, da die Stützstellen der BK 5 und BK 8 gleich hoch sind und denen der BK 6 und BK 9 entsprechen. Dies erklärt sich dadurch, dass bereits ab einer mechanisch-thermischen Belastung entsprechend der Belastungsklasse 5 der

Abfall bzw. dessen Bruchstücke komplett thermisch belastet sind und somit im gesamten Abfall sämtliche für das jeweilige Abfallgebilde relevanten thermischen Freisetzungprozesse (siehe Anhang A) stattfinden.

Bei den AGG 3 und 4 wurde bei der Herleitung der Freisetzungsteile im Rahmen der TSK Studien für die BK 5, 6, 8 und 9 angenommen, dass das Gebinde noch weitestgehend intakt ist und somit von der isolierenden Wirkung der Verpackung und der Konditionierung des radioaktiven Abfalls Kredit genommen werden kann. Die FA für kleine Aerosole der sonstigen Nuklide der BK 5 und 8 (halbstündiger Brand) unterscheiden sich daher nicht. Bei einem einstündigen Brand wird für diese beiden AGG trotz der weitestgehend intakten und isolierenden Verpackung davon ausgegangen, dass sich der Abfall komplett über sämtliche Schwellentemperaturen der thermischen Freisetzungprozesse erhitzt und diese Freisetzungprozesse somit im gesamten Abfall stattfinden. Bei einer Extrapolation zu höheren spezifischen mechanischen Energieeinträgen werden daher auch bei einem kurzen Brand die (skalierten) FA der BK 9 für die kleinen Aerosole der sonstigen Nuklide angesetzt, solange kein Nachweis erbracht wird, dass auch bei den höheren mechanischen Belastungen die Gebinde noch weitestgehend intakt sind.

Bei den AGG 5 und 7 führt die Extrapolation ausgehend von den (skalierten) Stützstellen der BK 5 und 8 bzw. 6 und 9 zu einem steigenden Freisetzungsteil für kleine Aerosole der sonstigen Nuklide, da angenommen wird, dass durch die zunehmende Zerstörung des Abfallgebildes infolge der mechanischen Belastung ein größerer Anteil des Abfalls über die relevanten Schwellentemperaturen erhitzt wird. Bei der Extrapolation der Werte ist zu berücksichtigen, dass natürlich nicht mehr als der komplette Abfall über diese Temperaturen erhitzt werden kann. Bei der Herleitung der FA der BK 8 und 9 der AGG 5 wird davon ausgegangen, dass die Hälfte des Abfalls voll thermisch belastet wird, bei den entsprechenden FA der AGG 7 ein Viertel des Abfalls. Somit kann für den FA von kleinen Aerosolen der sonstigen Nuklide ein Maximalwert für die thermische Freisetzung durch Pyrolyse des brennbaren Abfallanteils sowie Mitriss beim Verdampfen von Wasser von $5,6 \cdot 10^{-3}$ angesetzt werden, wenn nicht mehr nur die Hälfte bzw. ein Viertel des Abfalls voll thermisch belastet ist, sondern der komplette Abfall.

Bei der AGG 8 stellt sich bei der Extrapolation zu höheren mechanischen Energieeinträgen die Frage, ob die Spezifikation des Gussbehälters bei der anzunehmenden Belastung noch die Integrität des Behälters nachweist. Sollte dies der Fall sein, dann ist lediglich von leichten Undichtigkeiten im Deckelbereich auszugehen. Eine direkte Zufuhr von Sauerstoff findet aufgrund des sich durch die Erwärmung aufbauenden Überdrucks im

Behälter nicht statt. Als Freisetzungsprozesse für die sonstigen Nuklide können daher Pyrolyse und Mitrisss beim Verdampfen stattfinden und damit ein maximaler FA von $4 \cdot 10^{-3}$ für die kleinen Aerosole erreicht werden. Bei der BK 9 ist dieser Maximalwert bereits erreicht. Große Aerosole werden durch den Behälter zurückgehalten und nicht freigesetzt. Kann nicht nachgewiesen werden, dass der Gussbehälter die anzusetzenden mechanischen Belastungen aushält, dann wird vom Gussbehälter kein Kredit mehr genommen und, da keine Vorgaben für die Art und die Konditionierung des Abfalls vorausgesetzt wurden, das Gebinde wie AGG 1 behandelt.

Der mechanische Anteil der Freisetzung kleiner Aerosole ist bei den BK 5, 6, 8 und 9 für die Gebinde der TSK 09 um mehrere Größenordnungen kleiner als die Freisetzung durch die thermischen Prozesse. Es wird bei der hier vorgestellten Extrapolationsmethode angenommen, dass dies auch bei höheren mechanischen Energieeinträgen noch der Fall ist und die FA der kleinen Aerosole somit ausschließlich durch die thermische Freisetzung bestimmt sind und der mechanisch bedingte Anteil der Freisetzung durch die konservative Abschätzung, die in den TSK-Annahmen zur thermischen Freisetzung beinhaltet ist, ausreichend abgedeckt ist. Bei der genaueren Analyse hat sich aber herausgestellt, dass diese Annahme für verhältnismäßig kleine Gebinde (z. B. $0,2 \text{ m}^3$ im Vergleich zu $7,4 \text{ m}^3$ bzw. ca. 500 kg im Vergleich zu 11000 kg) und sehr hohen spezifischen mechanischen Energieeinträgen nicht mehr gewährleistet ist. Die Extrapolationsmethode wurde deshalb, wie im folgenden Abschnitt gezeigt, insgesamt angepasst, wobei sich die Anpassungen hauptsächlich auf, verglichen mit den Gebinden der TSK, kleinere Gebinde auswirken und für größere Gebinde nur zu vernachlässigbaren Änderungen der extrapolierten FA führen.

2.7 Aktualisiertes Verfahren zur konsistenten Skalierung und Extrapolation von Freisetzungsteilen

Wie im vorherigen Abschnitt abschließend erläutert, sind die zugrundeliegenden Annahmen für die dort vorgestellte Extrapolationsmethode nicht durchgängig erfüllt. Zusätzlich haben die Freisetzungsteile eine Aktualisierung erfahren, wie in Abschnitt 2.4 dargestellt. Bei der Aktualisierung wurden bei einigen AGG insbesondere FA der kleinen Aerosole der sonstigen Nuklide der BK 5 auf die Werte der BK 8 angehoben. Die bisherige Extrapolationsmethode mit Stützstellen aus diesen beiden Belastungsklassen führt dann rein mathematisch zu keiner weiteren Erhöhung bei den von der Anpassung bei der BK 5 betroffenen AGG.

Die im Folgenden vorgestellte Skalierungs- und Extrapolationsmethode geht nicht mehr davon aus, dass die thermisch bedingten Freisetzungen immer die FA der kleinen Aerosole dominieren.

Die vorgestellten Skalierungen und Extrapolationen müssen für jede AGG separat durchgeführt werden. Aus Gründen der Übersicht wurde nachfolgend in den Gleichungen auf einen weiteren Index zur Kennzeichnung der AGG verzichtet. Eine Beispielrechnung zur hier vorgestellten Methodik wird in Kapitel 3 präsentiert.

Rein rechnerisch können bei der im Folgenden beschriebenen Vorgehensweise FA größer als 1 herauskommen. Da nicht mehr als das gesamte Inventar eines Nuklides freigesetzt werden kann, wird in diesem Fall der Maximalwert der Freisetzungsanteile von 1 verwendet. Wird bei sehr kleinen Gebinden und/oder sehr hohen mechanischen Energieeinträgen das gesamte Inventar eines Nuklids durch die mechanische Belastung freigesetzt, dann sollte für die anschließende Ausbreitungs- und Dosisberechnung die Größenverteilung der Aerosole konservativ gewählt werden, falls bei der Ausbreitungs- und Dosisberechnung eine Unterscheidung zwischen den Größenbereichen der Aerosole gemacht wird. Eine weitere Berechnung von thermischen Freisetzungen bei zusätzlicher thermischer Belastung ist bei einer vollständigen mechanischen Freisetzung natürlich hinfällig.

2.7.1 Skalierung von Freisetzungsanteilen auf abweichende Gebindemassen und Gebindevolumina

BK 1, 4 und 7

Für die rein mechanischen Freisetzungsanteile der BK 1, 4 und 7 werden je nach AGG weiterhin die Skalierungen mit Masse bzw. Volumen, wie sie in Abschnitt 2.6.1 beschrieben wurden, für die großen (AED von 10 – 100 µm) und kleinen (0 – 10 µm) Aerosole verwendet.

Durch diese Skalierungen erhält man für jede AGG demnach die skalierten, rein mechanischen Freisetzungsanteile für große und kleine Aerosole

- der BK 1:
 $FA_{\text{groß,skaliert,mechanisch}}(BK1)$ und $FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK1)$
- der BK 4:
 $FA_{\text{groß,skaliert,mechanisch}}(BK4)$ und $FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK4)$

- und der BK 7:

$$FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(BK7) \text{ und } FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK7)$$

Da bei mechanischen Belastungen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Nuklide keine Rolle spielen, entsprechen die FA von H-3, C-14 und Halogenen für große und kleine Aerosole denen der sonstigen Nuklide.

BK 2 und 3

Für die großen Aerosole (sonstige Nuklide, H-3, C-14, Halogene) entsprechen die skalierten FA der BK 2 und BK 3 den skalierten FA der BK 1.

Um die FA für die BK 2 und 3 für die kleinen Aerosole bzw. Gase zu bestimmen, wird zunächst der Anteil $R1$ des Inventars bestimmt, der nicht mechanisch freigesetzt wurde. Dieser kann aus den mechanischen FA der BK 1 ermittelt werden, da für BK 1, 2 und 3 derselbe spezifische mechanische Energieeintrag angenommen wird:

$$R1 = 1 - [FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(BK1) + FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK1)]$$

Um die skalierten FA der kleinen Aerosole bzw. Gase der BK 2 zu erhalten, wird dann zunächst auf diesen Rest $R1$ der für die TSK Gebinde durch die thermische Freisetzung dominierte Freisetzungsteil $FA_{\text{klein,thermisch}}(BK2, X)$ angewendet und damit die zusätzliche thermische Freisetzung $FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}}(BK2, X)$ aus dem Rest konservativ abgeschätzt. Das X steht hier wahlweise für die sonstigen Nuklide oder H-3 oder C-14 oder die Halogene.

$$FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}}(BK2, X) = R1 \cdot FA_{\text{klein,thermisch}}(BK2, X)$$

Die skalierte BK 2 Gesamtfreisetzung der kleinen Aerosole bzw. Gase $FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}}(BK2, X)$ ergibt sich dann aus der Summe der rein mechanisch freigesetzten und der zusätzlich thermisch freigesetzten kleinen Aerosole bzw. Gase:

$$FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}}(BK2, X) = FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK1) + FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}}(BK2, X)$$

Um die Freisetzungsteile der BK 3 konservativ abzuschätzen, wird analog auf den Rest $R1$ der für die TSK-Gebinde durch die thermische Freisetzung dominierte

Freisetzungsteil der BK 3 angewendet, um die zusätzliche thermische Freisetzung $FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}}(BK3, X)$ konservativ abzuschätzen. Anschließend werden der mechanische und thermische Anteil zur Gesamtfreisetzung der kleinen Aerosole bzw. Gase $FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}}(BK3, X)$ addiert.

$$FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}}(BK3, X) = R1 \cdot FA_{\text{klein,thermisch}}(BK3, X)$$

$$FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}}(BK3, X) = FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK1) + FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}}(BK3, X)$$

BK 5 und 6

Analog zur Vorgehensweise bei BK 2 und 3 wird bei der Skalierung der FA der BK 5 und 6 vorgegangen. Für die großen Aerosole entsprechen die skalierten FA der BK 5 und BK 6 den skalierten FA der BK 4. Für die konservative Abschätzung der Freisetzungsteile der kleinen Aerosole bzw. Gase wird der Rest $R4$ bestimmt, der noch nicht mechanisch freigesetzt wurde:

$$R4 = 1 - [FA_{\text{groß,skaliert,mechanisch}}(BK4) + FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK4)]$$

In den übrigen Gleichungen des vorherigen Abschnitts „BK 2 und 3“ kann dann $R1$ durch $R4$, BK 2 durch BK 5 und BK 3 durch BK 6 ersetzt werden.

BK 8 und 9

In der gleichen Art und Weise wird für die BK 8 und 9 vorgegangen. Zunächst wird also der Rest $R7$ bestimmt (folgende Gleichung) und in den Gleichungen aus Abschnitt „BK 2 und 3“ dann $R1$ durch $R7$, BK 2 durch BK 8 und BK 3 durch BK 9 ersetzt.

$$R7 = 1 - [FA_{\text{groß,skaliert,mechanisch}}(BK7) + FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK7)]$$

2.7.2 Extrapolation zu höheren spezifischen mechanischen Energieeinträgen und zusätzlichen thermischen Belastungen

Bei der Extrapolation zu höheren mechanischen Energieeinträgen $\text{spez}E$ wird wie bei der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Skalierung zunächst die rein mechanische Freisetzung betrachtet. Wie beim bisherigen Verfahren wird von einer Proportionalität der FA vom spezifischen mechanischen Energieeintrag ausgegangen und eine lineare Extrapolation der FA auf Basis der skalierten FA der BK 4 und BK 7 vorgenommen

(siehe Gleichung in Abschnitt 2.6.2). Als Ergebnis der Extrapolation erhält man die Freisetzungsteile für die großen und kleinen Aerosole, die unabhängig vom Radionuklid X sind, $FA_{gro\ddot{u}f,skaliert,mechanisch}(spezE)$ und $FA_{klein,skaliert,mechanisch}(spezE)$. Mittels dieser beiden FA kann wieder der Rest $R(spezE)$ bestimmt werden, der noch nicht mechanisch freigesetzt wurde.

$$R(spezE) = 1 - [FA_{gro\ddot{u}f,skaliert,mechanisch}(spezE) + FA_{klein,skaliert,mechanisch}(spezE)]$$

Bei einer zusätzlichen thermischen Belastung⁷ wird auf diesen Rest $R(spezE)$ die maximale rein thermische Freisetzung $FA_{MAX\ thermisch}(X)$ für die vorliegende AGG (zur Herleitung dieser maximalen, rein thermischen FA siehe Anhang A) und das vorliegende Radionuklid X angewendet. Diese ist in Tab. 2.8 zusammengestellt. Für die zusätzliche Freisetzung aus der thermischen Belastung ergibt sich dann der Freisetzungsteil

$$FA_{klein,MAX\ thermisch}(X) = R(spezE) \cdot FA_{MAX\ thermisch}(X)$$

Zusammen mit dem mechanischen Anteil der Freisetzung ergibt sich für die kleinen Aerosole bzw. Gase dann der Freisetzungsteil

$$\begin{aligned} FA_{klein,gesamt}(spezE, X) \\ = FA_{klein,skaliert,mechanisch}(spezE) + FA_{klein,MAX\ thermisch}(X) \end{aligned}$$

Die Gesamtfreisetzung eines Nuklides $FA_{gesamt}(spezE, X)$ ergibt sich bei zusätzlicher thermischer Belastung schließlich aus der Summe der Freisetzung großer Aerosole (rein mechanisch bedingt) und der kleinen Aerosole bzw. Gase (mechanisch und thermisch bedingt):

$$FA_{gesamt}(spezE, X) = FA_{gro\ddot{u}f,skaliert,mechanisch}(spezE) + FA_{klein,gesamt}(spezE, X)$$

⁷ Eine Unterscheidung aufgrund verschiedener Branddauer wird bei hohen spezifischen mechanischen Energieeinträgen nicht mehr vorgenommen, da wegen der hohen mechanischen Zerstörung keine isolierende Verpackung mehr vorausgesetzt werden kann und konservativ davon ausgegangen wird, dass mögliche kleine Bruchstücke des radioaktiven Abfalls auch bei kurzen Branddauern voll thermisch belastet werden.

Tab. 2.8 Maximale rein thermische Freisetzungssanteile kleiner Aerosole bzw. Gase
(zur Herleitung siehe Anhang A)

Radionuklid	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
sonstige Nuklide	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$
H-3	1	1	1	1	0,5	1	0,5	1
C-14	1	1	1	1	$5,6 \cdot 10^{-3}$	1	$5,6 \cdot 10^{-3}$	1
Halogene	1	1	1	1	1	1	1	1

3 Ablaufschema und Beispielrechnung

Im Folgenden soll für die praktische Anwendung der in Abschnitt 2.7 vorgestellten neuen Skalierungs- und Extrapolationsmethodik ein Ablaufschema präsentiert werden, wie für ein vorgegebenes Abfallgebinde und vorgegebenen mechanischen und thermischen Belastungen die Freisetzungsanteile nuklidspezifisch berechnet werden können. Dabei ist zu beachten, dass die so berechneten Werte eine konservative Abschätzung für die jeweiligen FA darstellen und nicht den Anspruch haben, diese realitätsnah zu simulieren.

Beispielhaft werden hier für ein 200-L-Abfallfass ($V = 200 \text{ L}$) mit einer Masse von 500 kg ($M = 500 \text{ kg}$), zementfixiertem Abfall, einer maximal halbstündigen thermischen Belastung durch ein 800 °C heißes, vollumhüllendes Feuer zwei verschiedenen Beispielrechnungen durchgeführt. Beispielrechnung (BR) 1 geht von einer zusätzlichen spezifischen mechanischen Belastung $\text{spez}E_1$ von 100 J/kg aus, BR 2 von einer zusätzlichen spezifischen mechanischen Belastung $\text{spez}E_2$ von 3000 J/kg . In Beispielrechnung 1 (BR 1) sollen die FA für H-3 bestimmt werden, in Beispielrechnung 2 (BR 2) die für die sonstigen Nuklide.

1. Zuordnung einer Abfallgebindegruppe AGG **A** je nach Art des Abfalls, Konditionierung und Verpackung (siehe Tab. 2.3)

BR 1 und **BR 2**: Zuordnung zu AGG 5

2. Skalierungsfaktor passend zu Masse bzw. Volumen des Gebindes (Abschnitt 2.6.1)

BR 1 und **BR 2**: Bei AGG 5 werden die FA mit der Masse skaliert. Es ergibt sich jeweils ein Skalierungsfaktor von

$$f_{skal} = (11000 \text{ kg}/M)^{0,43} = (11000 \text{ kg}/500 \text{ kg})^{0,43} = 3,78$$

3. Zuordnung von Belastungsklassen durch die mechanische Belastungsklasse (siehe Tab. 2.1)

BR 1: Die spezifische mechanische Belastung fällt in den Bereich der BK 4, 5 und 6

BR 2: Die spezifische mechanische Belastung liegt über denen der TSK. Eine Extrapolation der FA ist daher nötig.

Im Folgenden Abschnitt 3.1 wird nun zunächst das weitere Ablaufschema für mechanische Belastungen im Bereich der TSK durchgeführt (BR 1). Anschließend folgt in Abschnitt 3.2 das weitere Ablaufschema für höhere spezifische mechanische Belastungen als die der TSK (BR 2).

3.1 Weiteres Ablaufschema für mechanische Belastungen kleiner als 467 J/kg

Fortführung von **BR 1**

4. Auswahl der Ausgangswerte aus den tabellierten Werten der TSK (aus Tab. 2.6 und ggf. Tab. 2.7) abhängig von BK und Nuklid

$$FA_{\text{groß,mechanisch}} = 3,6 \cdot 10^{-6}$$

aus Tab. 2.6, Spalte AGG 5, Zeile BK 4, 10-100 µm

$$FA_{\text{klein,mechanisch}} = 4,0 \cdot 10^{-7}$$

aus Tab. 2.6, Spalte AGG 5, Zeile BK 4, 0-10 µm

$$FA_{\text{klein,thermisch}} = 5,0 \cdot 10^{-1}$$

aus Tab. 2.7, Spalte AGG 5, Zeile BK 5, H-3

5. Skalierung der mechanischen FA mit dem Faktor f_{skal} (siehe 2.)

$$FA_{\text{groß,skaliert,mechanisch}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,78 = 1,36 \cdot 10^{-5}$$

$$FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}} = 4,0 \cdot 10^{-7} \cdot 3,78 = 1,51 \cdot 10^{-6}$$

6. Bestimmung des Restes, der noch nicht mechanisch freigesetzt wurde:

$$R = 1 - (FA_{\text{groß,skaliert,mechanisch}} + FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}})$$

$$R = 1 - (1,36 \cdot 10^{-5} + 1,51 \cdot 10^{-6}) = 0,999985$$

7. Anwendung des thermischen Freisetzunganteils auf den Rest R, um den thermischen FA bezogen auf das Gesamtinventar zu erhalten

$$FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}} = R \cdot FA_{\text{klein,thermisch}} = 0,999985 \cdot 5,0 \cdot 10^{-1} \\ = 0,499992$$

8. Skalierte Freisetzungsteil für kleine Aerosole bzw. Gase mechanisch und thermisch zum Gesamtfreisetzungsteil für kleine Aerosole bzw. Gase aufaddieren.

$$FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}} = FA_{\text{klein,skaliert,thermisch}} + FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}} \\ = 0,499992 + 1,51 \cdot 10^{-6} = 0,4999935 \approx 0,5$$

In dieser Beispielrechnung dominiert die thermische Freisetzung deutlich die mechanische, weswegen sich der skalierte Freisetzungsteil für kleine Aerosole nicht wesentlich vom ursprünglichen thermischen TSK-Tabellenwert der BK 5, AGG 5 für H-3 unterscheidet.

In der Beispielrechnung 1 ergeben sich somit die folgenden FA für H-3:

$$FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}} = FA_{\text{gro\ss,skaliert,gesamt}} = 1,36 \cdot 10^{-5}$$

$$FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}} \approx 0,5$$

$$FA_{\text{skaliert,gesamt}} = FA_{\text{gro\ss,skaliert,gesamt}} + FA_{\text{klein,skaliert,gesamt}} \approx 0,5$$

3.2 Weiteres Ablaufschema für mechanische Belastungen größer als 467 J/kg und damit einer Extrapolation der FA

Fortführung von **BR 2**

4. Auswahl der Ausgangswerte für die Extrapolation der mechanischen Freisetzungsteile

$$FA_{\text{gro\ss,mechanisch}}(BK4) = 3,6 \cdot 10^{-6}$$

aus Tab. 2.6, Spalte AGG 5, Zeile BK 4, 10-100 μm

$$FA_{\text{klein,mechanisch}}(BK4) = 4,0 \cdot 10^{-7}$$

aus Tab. 2.6, Spalte AGG 5, Zeile BK 4, 0-10 μm

$$FA_{\text{gro\ss,mechanisch}}(BK7) = 2,7 \cdot 10^{-5}$$

aus Tab. 2.6, Spalte AGG 5, Zeile BK 7, 10-100 μm

$$FA_{\text{klein,mechanisch}}(BK7) = 3,0 \cdot 10^{-6}$$

aus Tab. 2.6, Spalte AGG 5, Zeile BK 4, 0-10 μm

5. Skalierung der Ausgangswerte mit dem Faktor f_{skal} , um die Stützstellen der Extrapolation zu erhalten.

$$FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(BK4) = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,78 = 1,36 \cdot 10^{-5}$$

$$FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK4) = 4,0 \cdot 10^{-7} \cdot 3,78 = 1,51 \cdot 10^{-6}$$

$$FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(BK7) = 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot 3,78 = 1,02 \cdot 10^{-4}$$

$$FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(BK7) = 3,0 \cdot 10^{-6} \cdot 3,78 = 1,13 \cdot 10^{-5}$$

6. Extrapolation mit dem spezifischen, mechanischem Energieeintrag $spezE_2$ (Abschnitt 2.6.2, wie bei bisherigem Verfahren, unabhängig vom Nuklid)

$$\begin{aligned}
 FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(spezE_2) &= 1,02 \cdot 10^{-4} + \frac{1,02 \cdot 10^{-4} - 1,36 \cdot 10^{-5}}{466,8 - 246,9} (3000 - 466,8) \\
 &= 1,12 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(spezE_2) &= 1,13 \cdot 10^{-5} + \frac{1,13 \cdot 10^{-5} - 1,51 \cdot 10^{-6}}{466,8 - 246,9} (3000 - 466,8) \\
 &= 1,24 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

7. Bestimmung des Restes, der noch nicht mechanisch freigesetzt wurde.

$$\begin{aligned}
 R(spezE_2) &= 1 - (FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(spezE_2) \\
 &\quad + FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(spezE_2)) \\
 R(spezE_2) &= 1 - (1,12 \cdot 10^{-3} + 1,24 \cdot 10^{-4}) = 0,99876
 \end{aligned}$$

8. Auswahl des maximalen rein thermischen Freisetzunganteils aus Tab. 2.8 passend zu AGG und Nuklid

$$\begin{aligned}
 FA_{\text{MAX thermisch}}(\text{sonstige Nuklide}) &= 5,6 \cdot 10^{-3} \\
 &\text{aus Tab. 2.8, Spalte AGG 5, sonstige Nuklide}
 \end{aligned}$$

9. Anwendung des maximalen rein thermischen Freisetzunganteils auf den Rest

$$\begin{aligned}
 FA_{\text{klein,MAX thermisch}}(spezE_2, \text{sonstige Nuklide}) &= R(spezE_2) \cdot FA_{\text{MAX thermisch}}(\text{sonstige Nuklide}) \\
 FA_{\text{klein,MAX thermisch}}(spezE_2, \text{sonstige Nuklide}) &= 0,99876 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} \\
 &= 5,593 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

10. Skalierte Freisetzunganteile für kleine Aerosole bzw. Gase mechanisch und thermisch zum Gesamtfreisetzunganteil für kleine Aerosole bzw. Gase aufaddieren.

$$\begin{aligned}
 FA_{\text{klein,gesamt}}(spezE_2, \text{sonstige Nuklide}) &= FA_{\text{klein,skaliert,mechanisch}}(spezE_2) \\
 &\quad + FA_{\text{klein,MAX thermisch}}(spezE_2, \text{sonstige Nuklide}) \\
 FA_{\text{klein,gesamt}}(spezE_2, \text{sonstige Nuklide}) &= 1,24 \cdot 10^{-4} + 5,593 \cdot 10^{-3} \\
 &= 5,72 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

In Beispielrechnung 2 ergeben sich somit die folgenden FA für sonstige Nuklide:

$$\begin{aligned} FA_{\text{gro\ss,skaliert,mechanisch}}(\text{spez}E_2, \text{sonstige Nuklide}) &= FA_{\text{gro\ss,skaliert,gesamt}} \\ &= 1,12 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$FA_{\text{klein,gesamt}}(\text{spez}E_2, \text{sonstige Nuklide}) = 5,72 \cdot 10^{-3}$$

$$FA_{\text{gesamt}}(\text{spez}E_2, \text{sonstige Nuklide}) = 6,84 \cdot 10^{-3}$$

4 Literaturverzeichnis

- /BAR 03/ Barlow, S. V., Turner, G. E., Fry, C. J., White, I. F.: Modelling of Unshielded ILW Packages Under Fire Conditions. Hrsg.: UK Nirex Ltd, Nirex Report, N/073, 47 S., März 2003.
- /FRY 10/ Fry, C. J.: Release Fractions from Waste Packages Exposed to Fire, Prepared for NDA. Serco, SERCO/TCS/6663/01 Issue 1, 39 S., November 2010.
- /GRS 91a/ Lange, F., Gründler, D., Schwarz, G.: Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad. GRS-84, 164 S., ISBN 3-923875-34-7, Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Juli 1991.
- /GRS 91b/ Schwarz, G., Fett, H.-J., Lange, F., Philipps, F., Nitsche, F., Gründler, D., Philip, G.: Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad, (Ergänzungsband), Auftragsnummer 84 845. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-1755/II, 299 S., Juni 1991.
- /GRS 10/ Sentuc, F.-N., Brücher, W., Büttner, U., Fett, H.-J., Lange, F., Martens, R., Schmitz, B. M., Schwarz, G.: Transportstudie Konrad 2009, Sicherheitsanalyse zur Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-256, 190 S., ISBN 978-3-939355-31-1: Köln, 2010.
- /GRS 13/ Brücher, W., Büttner, U., Eich, P., Martens, R., Richter, C., Schrödl, E., Sentuc, F.-N., Thielen, H.: Vertiefung und Ergänzung ausgewählter Aspekte der Abfalltransportrisikoanalyse für die Standortregion der Schichtanlage Konrad, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02600 Arbeitspaket 1 Teilaufgaben 11-14. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3684, 162 S.: Köln, Februar 2013.

- /GRS 17/ Richter, C., Forell, B., Sentuc, F.-N.: Überprüfung des unfallbedingten Freisetzungsverhaltens bei der Beförderung radioaktiver Stoffe, Abschlussbericht, Arbeitspaket 3. GRS-Bericht, GRS - 482, 90 S., ISBN 978-3-946607-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Oktober 2017.
- /GRÜ 87/ Gründler, D.: Systemanalyse Konrad, Teil 3, Bestimmung störfallbedingter Aktivitätsfreisetzung, Auftragsnummer 41372. Hrsg.: Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-1389, 138 S., November 1987.
- /IAEA 14/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition), Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG-26, 2012. Aufl., 450 S., ISBN 978-92-0-136910-9: Vienna, 2014.
- /KUG 17/ Kugel, K., Möller, K. (Hrsg.): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand Februar 2017), Endlager Konrad. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 102 S.: Salzgitter, 10. Februar 2017.
- /LAN 07/ Lange, F., Martens, R., Nolte, O., Lödding, H., Koch, W., Hörmann, E.: Testing of packages with LSA materials in very severe mechanical impact conditions with measurement of airborne release. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, Bd. 18, Nr. 2, S. 59–71, DOI 10.1179/174651007X220186, 2007.
- /NDA 10/ Nuclear Decommissioning Authority (NDA) (Hrsg.): Geological Disposal, Waste Package Accident Performance, Status Report. NDA Report, NDA/RWMD/032, 105 S., Dezember 2010.
- /SEN 17/ Sentuc, F.-N., Richter, C.: Diskussion zu thermischer Freisetzung. GRS, Köln, 3. August 2017.
- /STE 10/ Steyer, S. (Hrsg.): Endlager Konrad, Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, radiologische Aspekte - Endlager Konrad –, Stand: Oktober 2010. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), SE-IB-30/08-REV-1, 178 S.: Salzgitter, Oktober 2010.

/TUR 00/ Turner, F. M.: Recommended Release Fractions for Standard Nirex Packages, Input Data for the Analysis of Fire and Impact Hazards Within Transport and Repository Safety Assessments. UK Nirex Ltd, 23 S., Dezember 2000.

Abkürzungsverzeichnis

ABK	Abfallbehälterklasse
AED	Aerodynamischer Äquivalentdurchmesser
AGG	Abfallgebindegruppe
APG	Abfallproduktgruppe
BK	Belastungsklasse
BR	Beispielrechnung
FA	Freisetzungsanteil
TSK	Transportstudie(n) Konrad

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Nummerierung der Belastungsklassen in Abhängigkeit von mechanischer und thermischer Belastungsstufe	4
Tab. 2.2	Behältergrundtypen für die Verpackung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, Tabelle 1 aus Anhang 1 der Endlagerungsbedingungen Konrad /KUG 17/	7
Tab. 2.3	Definition der TSK-Abfallgebindegruppen mit Zuordnung der APG	9
Tab. 2.4	Partikelgrößenabhängige Freisetzungssanteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe aus /GRS 13/ mit farblich gekennzeichneten Korrekturen bei AGG 5 und AGG 7 in BK 7 bis 9 für die großen Partikel (zu diesen Korrekturen siehe /GRS 17/)	12
Tab. 2.5	Freisetzungssanteile für H-3, C-14 und Halogene (AED 0 - 10 µm) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe (w. s. N.: wie sonstige Nuklide) aus /GRS 13/. FA für große Aerosole wie bei sonstigen Nukliden.....	13
Tab. 2.6	Partikelgrößenabhängige Freisetzungssanteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe nach /GRS 17/	14
Tab. 2.7	Freisetzungssanteile für H-3, C-14 und Halogene (AED 0 - 10 µm) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe (w. s. N.: wie sonstige Nuklide) aus /GRS 17/. FA für große Aerosole wie bei sonstigen Nukliden.....	15
Tab. 2.8	Maximale rein thermische Freisetzungssanteile kleiner Aerosole bzw. Gase (zur Herleitung siehe Anhang A).....	24

A Anhang: Freisetzungen aus thermischen Belastungen

Freisetzungen aus Abfallgebinden durch thermische Belastungen können prinzipiell durch vier verschiedene physikalische/chemische Prozesse stattfinden, die von der chemischen Zusammensetzung des Abfalls, Sauerstoffverfügbarkeit und Temperatur des Abfalls abhängen:

1. Pyrolyse des Abfallproduktes
Thermische Zersetzung bei eingeschränkter Luftzufuhr und damit Sauerstoffmangel, wenn das Abfallprodukt thermisch instabile Bestandteile enthält und eine gewisse Schwellentemperatur (Annahme in der TSK 09: 300 °C) im Abfall überschritten ist. Gasförmige Pyrolyseprodukte strömen aus dem Gebinde aus und setzen einen Anteil der Aktivität des Abfalls frei.
2. Verbrennen des Abfallproduktes
Brennbare Abfallprodukte können bei ausreichender Luftzufuhr abbrennen und Aktivität freisetzen.
3. Verdampfen von Wasser im Abfallprodukt
Bei wasserhaltigen Abfallgebinden, insbesondere sind dies zementierte/betonierte Abfälle, verdampft bei erhöhten Temperaturen das Wasser (bei Normaldruck bei 100 °C). Beim Phasenübergang des Wassers können auch radioaktive Stoffe in die Gasphase übergehen.
4. Sublimation bzw. Verdampfen radioaktiver Stoffe
Leichtflüchtige Radionuklide wie Halogene, C-14 oder Tritium können bei Erwärmung des Abfalls direkt verdampfen. Ebenso können Oberflächenkontaminationen an metallischen Feststoffen bei gewissen thermischen Randbedingungen verdampfen oder sublimieren.

Die in der TSK 09 /GRS 10/ bzw. der Vertiefung zur TSK /GRS 13/ veröffentlichten Werte für die Freisetzungsanteile bei zusätzlicher thermischer Belastung (BK 2, 3, 5, 6, 8, 9) beruhen hauptsächlich auf den bereits in der Transportstudie Konrad 1991 (TSK 1991) /GRS 91a/ angenommenen Werten, die wiederum auf Untersuchungen der Systemanalyse Konrad /GRÜ 87/ zurückgreifen. In der Systemanalyse Konrad wurde dabei lediglich ein einstündiger Brand (das Abfallgebinde vollständig umhüllend bei 800 °C) angenommen, der für alle Brandereignisse bei Handhabungs- und Transportunfällen auf dem Anlagengelände abdeckend sei. In der TSK 1991 wurde zusätzlich der halbstündige Brand mit sonst gleichen Randbedingungen als mögliche thermische Belastung eingeführt. Bereits diese thermische Belastung entspricht den Prüfbedingungen der IAEA-

Transportvorschriften für unfallfeste Typ-B Transportbehälter und wird als realistische thermische Belastung für schwere Transportunfälle angesehen /IAEA 14/. Abweichend davon werden für die Bestimmung von Freisetzunganteilen aus Abfallgebinden im Zusammenhang mit der Lagerung in Endlagerstätten in Großbritannien Brände von einer Stunde Länge und 1000 °C Brandtemperatur angesetzt /TUR 00/, /BAR 03/, /FRY 10/. Die höhere Brandtemperatur wird damit begründet, dass die eingelagerten Abfallgebinde wegen ihrer Isoliereigenschaften die Flammtemperatur kaum reduzierten und zusätzlich davon auszugehen sei, dass die Wände des Lagers eine effiziente Wärmeabstrahlung verhindern. Die längere Branddauer wiederum wird mit als wahrscheinlich anzusehenden zusätzlichen Brandlasten und dem erschwerten Zugang für einen Löschangriff begründet /NDA 10/.

Für die Bestimmung der Freisetzunganteile schließen sich an die Annahmen zum Brandverlauf sowohl bei den Transportstudien Konrad als auch bei den britischen Betrachtungen Wärmeübergangs- und Wärmeleitungsrechnungen in die Abfallgebinde an. Betrachtet wird dabei auch die Nach-Brand-Phase, bei der sich die Außenwand des Abfallgebindes schon wieder abkühlt, sich die Temperaturerhöhung im Inneren aber noch weiter ausdehnt. Maßgeblich für die Freisetzung sind der Temperaturverlauf im Abfallgebinde und das Teilvolumen, in dem vorgegebene Schwellenwerte überschritten werden, im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Abfallgebindes. Bei der britischen Vorgehensweise werden dazu die zu einem beliebigen Zeitpunkt maximal an einem Ort erreichten Temperaturen herangezogen, bei den Konrad Untersuchungen werden das maximale Volumen, das während des Simulationszeitraums gleichzeitig eine Schwellentemperatur überschreitet bzw. auch der zeitabhängige Verlauf der Temperaturverteilung berücksichtigt.

Um den Aufwand der statistischen Aufbereitung von Transportunfallstatistiken im Rahmen der Transportstudien Konrad zu beschränken, wurden lediglich zwei thermische Belastungsstufen verwendet (halbstündiger bzw. ganzstündiger vollständig umhüllender Brand mit 800 °C Brandtemperatur).

Mit der verwendeten Methode könnten auch Freisetzunganteile für kürzere Brandzeiten bestimmt werden. Die Eingruppierung sämtlicher Brandereignisse bei einem Transportunfall, auch kürzerer Brände, die das Abfallgebinde nicht vollständig umhüllen, mindestens in die thermischen Belastungen entsprechend BK 2, stellt eine konservative Abschätzung für Transportunfälle dar. Diese grobe Klassierung ist der Tatsache

geschuldet, dass Datenbanken zu Transportunfällen in den seltensten Fällen detaillierte Informationen über den Brandverlauf bei einem auftretenden Brand bereithalten.

Solange keine detaillierten Betrachtungen zu einem Brand vorliegen und somit der Brandverlauf nicht für die Freisetzung konservativ bestimmt wurde, empfiehlt es sich daher, wie im Falle der TSK bei unbekanntem Brandverläufen, mindestens von den thermischen Belastungen entsprechend der BK 2 auszugehen. Insbesondere die Abstrahlgeometrie in einem Lager ist nicht mit denen im Freiland vergleichbar: Höhere Brandtemperaturen könnten erreicht werden und in der Nach-Brand-Phase eine langsamere Abkühlung stattfinden.

Sollen die FA der TSK für die thermisch-mechanischen Belastungen für die Bestimmung der FA für in der Schweiz vorkommende Abfalltypen herangezogen werden und werden keine angepassten Wärmeübergangs- und Wärmeleitungssimulationen angestellt, dann ist zudem zu bedenken, dass es sich bei diesen Abfalltypen auch um kleinere Gebinde im Vergleich zu den Abfallgebänden für die Endlagerung in Konrad handeln kann. Bei kleineren Gebänden liegt ein größeres Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis vor. Bei angenommener gleicher thermischer Belastung und gleichem Inhalt wird bei einem kleineren Behälter daher ein größeres Teilvolumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen auf eine vorgegebene Temperatur erhitzt.

Bei sehr kurzen Bränden und keiner mechanischen Vorbelastung der Abfallgebände ist die Verwendung der Freisetzungsanteile der BK 2 sehr konservativ. Bei unbekanntem sonstigen Brandbedingungen (Temperaturverlauf, Abstrahlgeometrie im Lager) sowie der möglicherweise kleineren Gebände im Vergleich zur TSK sollten ab einer Branddauer von 3 Minuten die FA der BK 2 der TSK für mechanisch unbelastete aber thermisch belastete Gebände verwendet werden. Bei einer kürzeren Branddauer t_1 kann eine Skalierung der FA der BK 2 entsprechend

$$FA(t_1) = FA(BK 2) \cdot \frac{t_1}{3 \text{ min}}$$

als ausreichend konservativ angesehen werden. Kann mittels neuen, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechenden Untersuchungen gezeigt werden, dass der Abfall im Gebände während des Brandes und in der Nach-Brand-Phase eine Temperatur von 40 °C nicht überschreitet, können die thermischen FA für mechanisch nicht vorbelastete Gebände vernachlässigt werden.

Bei den mechanisch vorbelasteten Gebinden ist Folgendes zu beachten:

Bei den Freisetzungsteilen der AGG 5 und 7 wurden in der TSK 09 Anpassungen gegenüber der TSK 1991 vorgenommen und diese leicht nach unten korrigiert. Neuere Untersuchungen von Lange et al. /LAN 07/ hatten ergeben, dass es ausreichend konservativ ist, bei der mechanischen Vorbelastung der BK 5-6 einen Volumenanteil von 20 % des Gebindes zu den Freisetzungsmechanismen Pyrolyse und Mitverdampfen anzusetzen, bei den BK 8-9 einen Volumenanteil von 50 %. Für die AGG 7 wird jeweils angenommen, dass die Rückhalte- und Isolierwirkung des Betonbehälters größer ist als die des Stahlblechcontainers der AGG 5. Deshalb werden für die BK 5-6 und BK 8-9 jeweils die Hälfte der FA der AGG 5 angenommen.

Für die maximalen thermischen Freisetzungsteile der AGG 5 und 7 bedeutet dies, dass sich die FA der BK 8 noch maximal um einen Faktor 2 bzw. 4 erhöhen.

Bei den AGG 1, 2 und 6 wird bereits bei der Belastungsklasse 5 angenommen, dass 100 % des Abfalls den vollen thermischen Belastungen ausgesetzt sind und die eingangs dieses Anhangs A beschriebenen Prozesse ablaufen. Damit entspricht der FA der BK 5 bereits dem maximalen thermischen Freisetzungsteil für die kleinen Aerosole bzw. Gase.

Für die AGG 3 und 4 wird bei der Herleitung der thermischen Freisetzungsteile davon ausgegangen, dass die Gebinde trotz der mechanischen Vorbelastung bis einschließlich BK 7 noch weitgehend intakt sind. Die Freisetzungsteile der kleinen Partikel sind lediglich von der Branddauer abhängig, da bei längeren Bränden höhere Temperaturen in die Gebinde eindringen. Bei höheren mechanischen Belastungen ist zu prüfen, inwieweit noch von einem weitestgehend intakten Gebinde ausgegangen werden kann (z. B. mittels Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode bis zur vollständigen Umsetzung der kinetischen Energie). Ist dies der Fall, dann können weiterhin die FA der BK 8 verwendet werden. Sollte dies nicht der Fall sein, kann der Freisetzungsteil für einen einstündigen Brand für diese Gebinde als ausreichend konservativer Wert verwendet werden.

Bei der AGG 8 ist zu beachten, dass der Störfall-Auslegungsbereich des für die AGG 8-Zuordnung maßgeblichen Gussbehälters bei den Belastungen, die bei den Transportfällen der TSK angenommen werden, nicht überschritten wird. Wenn überhaupt, dann treten bei den mechanischen Belastungen der TSK Undichtigkeiten höchstens im

Deckelbereich mit einer geringen, durch die Störfall-Auslegung spezifizierten Leckrate auf. Wegen des Überdrucks im Behälter, wenn dieser sich aufheizt, strömen aus diesen Lecks Gase und kleine Aerosole aus. Sauerstoff kann aber nicht eindringen, wodurch beispielsweise kein Verbrennen des Abfalls, sondern lediglich Pyrolyse, Sublimation oder (Mit-)Verdampfen möglich sind. Bei mechanischen Belastungen, die den Störfall-Auslegungsbereich überschreiten, sind Cliff-Edge-Effekte nicht auszuschließen. Ein solcher Effekt könnte beispielsweise sein, dass der Deckel des Gebindes komplett abgesprengt wird, wodurch Sauerstoff an den Abfall gelangen kann und somit Verbrennen statt Pyrolyse mit einer um mehrere Größenordnungen höheren Freisetzungsrates stattfinden kann.

Da für den Abfall innerhalb des Gussbehälters bei der Zuordnung zur AGG 8 keine Vorgaben gemacht werden, wird konservativ von brennbaren, unfixierten Abfällen ausgegangen. Bei nicht mehr gewährleisteter Integrität des Behälters wird das Abfallgebilde daher wie AGG 1 behandelt.

A.1 Kleine Gebinde

Bei kleineren Gebinden als die für das Endlager Konrad zugelassenen (vgl. Tab. 2.2) stellt sich die Frage, inwieweit die für die AGG bestimmten Freisetzungssanteile bei thermischen Belastungen übertragen werden können.

Im Folgenden werden, basierend auf den Herleitungen aus /GRÜ 87/ bzw. /GRS 91b/, Maximalwerte für die thermische Freisetzung der leichtflüchtigen Nuklide (H-3, Halogene und C-14 in leichtflüchtiger Form) sowie für die sonstigen Nuklide angegeben. Betrachtet wird der FA für kleine Aerosole ($AED < 10 \mu\text{m}$) bzw. Gase für die unterschiedlichen Freisetzungsprozesse⁸. Diese Maximalwerte decken Freisetzungen ab, bei denen das Abfallgebilde komplett abbrennt bzw. die Temperatur des Abfalls komplett über den Schwellenwerten für Pyrolyse (300 °C) bzw. Mitrisis beim Verdampfen von Wasser (100 °C) liegt.

⁸ In /GRÜ 87/ bzw. /GRS 91b/ wird davon ausgegangen, dass durch die thermischen Freisetzungsprozesse keine Radionuklide in Form von großen Aerosolen zwischen 10 und 100 μm AED freigesetzt werden, sondern in Form von kleinen Aerosolen bzw. Gasen.

Behandlung von C-14:

Unterscheidung nach Art der Konditionierung: C-14 wird bei zementfixierten Abfällen als mittelflüchtig und nicht mehr leichtflüchtig angenommen /GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 3.5. Bei zementfixierten Abfällen wird C-14 bezüglich der thermischen Freisetzung daher wie die sonstigen Nuklide behandelt.

A.2 Verbrennen

Voraussetzung: Brennbarer Abfall, Sauerstoffzutritt

FA_{\max} (sonstige Nuklide) = 0,1 /GRS 91b/, Anhang IV, Abschnitt 2.2

FA_{\max} (H-3, C-14, Halogene) = 1 (schon bei BK 2, AGG 1 angenommen /GRS 13/)

A.3 Pyrolyse (über 300 °C)

Voraussetzung: Brennbarer Abfall, Temperatur über 300 °C, kein Sauerstoffzutritt:

FA_{\max} (sonstige Nuklide) = $5 \cdot 10^{-3}$ /GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 2.1

FA_{\max} (H-3, C-14 in leichtflüchtiger Form, Halogene) = 1

Leichtflüchtige Verbindungen (H-3, Halogene und nicht zementfixiertes C-14) werden schon bei Temperaturen von 100 °C bzw. 40 °C komplett freigesetzt.

A.4 Mitriss beim Verdampfen von Wasser (über 100 °C)

Bei Temperaturen über 100 °C

FA_{\max} (sonstige Nuklide) = $5 \cdot 10^{-4}$ /GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 2.3

FA_{\max} (H-3, C-14 in leichtflüchtiger Form, Halogene) = 1

Leichtflüchtige Verbindungen (H-3, Halogene und nicht zementfixiertes C-14) werden schon bei Temperaturen von 100 °C bzw. 40 °C komplett freigesetzt. Es wird bei zementfixierten Abfällen zudem angenommen, dass nur die Hälfte des H-3 in verdampfbare Form vorliegt (siehe /GRS 91b/, Anhang IV, Abschnitt 2.2: „...verdampfbarem Wasseranteil von 50 %“)

A.5 Sublimation, Verdampfen

Leichtflüchtige Nuklide:

FA_{\max} (H-3 als HTO bei über 100 °C) = 1 /GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 2.4;

Ausnahme bei zementfixierten Abfällen,

FA_{\max} (H-3 als HTO bei über 100 °C, zementfixiert) = 0,5

FA_{\max} (Halogene in organischer Form (z. B. Methyljodid (CH_3I) bei über 40 °C) = 1
/GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 2.4

FA_{\max} (C-14 (leichtflüchtige Form, z. B. Methyljodid) bei über 40 °C) = 1
/GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 2.4

Mittel- und schwerflüchtige Nuklide:

Herleitung in /GRÜ 87/, Anhang I, Abschnitt 2.4 bzw. Kapitel 4 für einen Stahlblechcontainer. Für diese großen Gebinde wird mit zeitabhängigen Temperaturfeldrechnungen bei einer thermischen Belastung von einer Stunde und einer anschließenden Abkühlphase von einer Stunde für CsI ein FA von $4 \cdot 10^{-3}$ bestimmt. Dabei liegen den Betrachtungen die folgenden Annahmen und Konservativitäten zugrunde:

- Annahme: rund 27 % der Aktivität der sonstigen Radionuklide liegen beim TSK-Abfall in mittelflüchtiger Form vor (/GRÜ 87/, Anhang I, Kapitel 2.4)
- Konservativität durch Annahme, dass Aktivität komplett als Oberflächenkontamination vorliegt
- Konservativität durch Berechnung mit CsI mit hohem mittelflüchtigem Anteil

Eine Betrachtung der in Tabelle 6 von /GRÜ 87/, Anhang I, präsentierten Freisetzungswerte für verschiedene Bereiche des Stahlblechcontainers zeigt, dass in den am stärksten erhitzten Randbereichen bis rund $6 \cdot 10^{-2}$ für rein mittelflüchtiges CsI berechnet werden. Für kleine Gebinde muss diese starke Erhitzung für den gesamten Abfall angenommen werden. Da es sich um einen zeitabhängigen Prozess des Abdampfens bzw. Sublimierens der sonstigen Nuklide handelt, kann ein Maximalwert für die Freisetzung unterhalb von 1 nur dann abgeschätzt werden, wenn die Dauer der thermischen Belastung und das Verhältnis von mittel- zu schwerflüchtigem Anteil bekannt sind.

Bei einer thermischen Belastung entsprechend der BK 3 kann allerdings davon ausgegangen werden, dass eine Freisetzung von $5 \cdot 10^{-2}$ für ein Gemisch aus mittel- und schwerflüchtigen Verbindungen und einer nicht komplett als Oberflächenkontamination

vorliegenden Aktivität eine konservative Wahl für die FA der sonstigen Nuklide darstellt /SEN 17/.

A.6 Zuordnung der thermischen Freisetzungsmechanismen zu den APG

In /GRÜ 87/, Anhang 1, Kapitel 3 werden den APG die folgenden thermischen Freisetzungsprozesse zugeordnet.

APG 1: Verbrennen

APG 2: Verbrennen für den brennbaren Anteil, wenn Sauerstoffzutritt möglich, sonst Pyrolyse, Mitriss beim Verdampfen von Wasser (abhängig vom Wassergehalt und Annahmen dazu, welcher Anteil des Wassers ausgasen kann), Sublimation und Verdampfen.

APG 3: Sublimation und Verdampfen

APG 4: Pyrolyse

APG 5: Mitriss beim Verdampfen, Pyrolyse, C-14 nur schwerflüchtig /GRÜ 87/, Anhang 1, Abschnitt 3.5

APG 6: Mitriss und Verdampfen / Sublimation, C-14 wird nur schwerflüchtig angenommen /GRÜ 87/, Anhang 1, Abschnitt 3.6

B Anhang: Abschätzung des mechanischen Energieeintrages bei Gebindestapeln

Ein entscheidender Parameter bei der konservativen Abschätzung der Freisetzunganteile mit den in den Abschnitten 2.6 und 2.7 Skalierungs- und Extrapolationsmethoden bei kombiniert thermisch- und mechanischen Belastungen, ist der spezifische mechanische Energieeintrag (*spezE*) in das Abfallgebäude, also der mechanische Energieeintrag pro Masse des Gebäudes.

B.1 Transportunfall

Bei Transportunfällen, die in den Transportstudien Konrad betrachtet werden, wird der Aufprall eines Abfallgebüdes mit der Geschwindigkeit v_G auf ein unnachgiebiges Hindernis angenommen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass das Gebäude mit der Masse M_G danach in Ruhe ist ($v_1 = 0$) und die vorher vorhandene kinetische Energie $E_{kin,G}$ komplett in die mechanische Belastung, also die (teilweise) Deformation, umgesetzt wird. Der spezifische mechanische Energieeintrag für einen Transportunfall ist dann also

$$spezE = \frac{E_{kin,G}}{M_G} = \frac{1/2 M_G \cdot v_G^2}{M_G} = \frac{1}{2} \cdot v_G^2$$

B.2 Aufprall einer bewegten Masse auf ein einzelnes Gebäude

Im Falle von Störfall-Untersuchungen auf Abfalllager ist nicht zwangsläufig das Abfallgebäude in Bewegung, sondern es kann auch vorkommen, dass eine bewegte Masse M_b mit einer Geschwindigkeit v_b auf ein ruhendes Gebäude ($v_G = 0$, Masse M_G) prallt. Als Energie für die Deformation des Gebäudes steht die kinetische Energie der bewegten Masse zur Verfügung:

$$E_{kin,b} = 1/2 M_b \cdot v_b^2$$

Zusätzlich wird angenommen, dass das Gebäude auf einem unnachgiebigen Untergrund steht und dass die stoßende Masse ebenfalls unnachgiebig ist und somit weder die stoßende Masse noch der Boden kinetische Energie aufnehmen und sich deformieren. Für den Energieeintrag in das getroffene Gebäude stellt dies eine konservative Annahme dar,

da $E_{kin,b}$ komplett eingetragen wird. Der spezifische mechanische Energieeintrag ist somit:

$$spezE = \frac{E_{kin,b}}{M_G} = \frac{1/2 M_b \cdot v_b^2}{M_G}$$

Das Verhältnis von stoßender und gestoßener Masse spielt hier, anders als beim Transportunfall, neben der anfänglichen Geschwindigkeit der stoßenden Masse ebenfalls eine Rolle.

B.3 Aufprall einer bewegten Masse auf einen Gebindestapel

Näherungsweise lässt sich der Aufprall einer mit der Geschwindigkeit v_b bewegten Masse M_b auf einen Gebindestapel (n Lagen, oberste Lage Masse M_1 , zweitoberste Lage Masse M_2 etc. bis zur n -ten Lage mit der Masse M_n) als Abfolge unelastischer oder plastischer Stöße betrachten. Die gestoßenen Massen sind vor dem Stoß in Ruhe ($v = 0$). Mit den zusätzlichen Annahmen von unnachgiebiger stoßender Masse und einem unnachgiebigen Untergrund lassen sich die folgenden Überlegungen und Gleichungen für den Energieeintrag in die jeweiligen Gebindelagen ableiten.

Für jeden unelastischen Stoß gilt die Impulserhaltung. Stoßende und gestoßene Masse bewegen sich nach dem Stoß mit der gleichen Geschwindigkeit v_i als eine gemeinsame Masse $M_{b,i}$ in Stoßrichtung fort. Für den ersten Stoß gilt demnach:

$$M_b \cdot v_b = (M_b + M_1) \cdot v_1 = M_{b,1} \cdot v_1$$

Damit lässt sich die Geschwindigkeit nach dem Stoß berechnen als

$$v_1 = \frac{M_b \cdot v_b}{M_{b,1}} = \frac{M_b \cdot v_b}{M_b + M_1}$$

Die nach dem Stoß noch vorhandene kinetische Energie ist $E_1 = \frac{1}{2} M_{b,1} \cdot v_1^2$.

Die Differenz zwischen der kinetischen Energie vor dem Stoß $E_{kin,b} = \frac{1}{2}M_b \cdot v_b^2$ und der Energie E_1 nach dem Stoß ist

$$\Delta E_1 = E_{kin,b} - E_1$$

Mit der Annahme, dass diese Differenzenergie komplett in die getroffene Gebindelage als mechanische Belastung eingetragen wird, ergibt sich als spezifischer mechanischer Energieeintrag in der ersten Lage

$$spezE_1 = \frac{\Delta E_1}{M_1}$$

Für die nächsten $n-1$ Stoßabfolgen gilt mit denselben Annahmen eines plastischen Stoßes und der Energieaufnahme einzig in der gestoßenen Masse:

$$v_i = \frac{M_{b,i-1} \cdot v_{i-1}}{M_{b,i}} = \frac{M_{b,i-1} \cdot v_{i-1}}{M_{b,i-1} + M_i}$$

$$E_i = \frac{1}{2}M_{b,i} \cdot v_i^2$$

$$\Delta E_i = E_{i-1} - E_i$$

$$spezE_i = \frac{\Delta E_i}{M_i}$$

Bei einer hohen anfänglichen Energie $E_{kin,b}$ ist die kinetische Energie nach dem Stoß auf die unterste Lage zunächst nicht komplett in die Gebinde umgesetzt ($v_n \neq 0$, $E_i \neq 0$). Mit der Stoßabfolge bis zur untersten Lage ist der Prozess der Energieeinbringung in die Gebinde also noch nicht abgeschlossen. Dies ist erst der Fall, wenn keine kinetische Energie mehr im System vorhanden ist. Die kinetische „Restenergie“ muss also sinnvoll als mechanischer Energieeintrag auf die Gebinde verteilt werden. Verschiedene Näherungen, wie sich diese Restenergie auf die einzelnen Gebindelagen verteilt, sind dabei denkbar. Die Verteilung der Restenergie wirkt sich auf die mechanisch bedingten Freisetzunganteile aus. Die Näherungen lassen sich wie folgt beschreiben:

- Methode 1: Es wird angenommen, dass die kinetische Restenergie vollständig als Deformationsenergie durch die unterste Behälterlage aufgenommen wird.

- Methode 2: Es wird angenommen, dass der Impuls der untersten Behälterlage durch den Hallenboden elastisch reflektiert wird und die Stoßfolge sich von der untersten Behälterlage bis zum stoßenden Trümmerteil umkehrt. Dabei ist zu beachten, dass die gestoßenen Lagen im Behälterstapel nicht in Ruhe sind, sondern sich vor dem jeweiligen Stoß mit der Endgeschwindigkeit der ersten Stoßfolge auf den Hallenboden zu bewegen. Die umgekehrte Stoßfolge bremst Trümmer und Behälterstapel auf eine reduzierte Endgeschwindigkeit ab, die wiederum als Eingangsgeschwindigkeit für die erneute Betrachtung des umgekehrten Stoßprozesses dient. Die umgekehrte Stoßfolge wird auf diese Weise so lange wiederholt, bis die kinetische Restenergie vernachlässigt werden kann.
- Methode 3: Es wird angenommen, dass die kinetische Restenergie homogen durch den Stapel insgesamt aufgenommen wird. Nach dieser Vorstellung werden alle Fasslagen mit dem gleichen zusätzlichen massenspezifischen Energieeintrag beaufschlagt.

Beispielhaft wird in Abb. B.1 der mit den verschiedenen Methoden berechnete mechanische Energieeintrag in einen Stapel mit 8 Fasslagen dargestellt.

Welche der drei Varianten den bzgl. der Freisetzung ungünstigsten (konservativen) Fall darstellt, ist nicht generisch festzulegen, da die Verteilung der Gebinde und Inventare innerhalb des Stapels für die Freisetzung ausschlaggebend ist. So stellt die erste Variante dann den ungünstigsten Fall dar, wenn die Freisetzung von den Gebinden in der untersten Lage dominiert wird. Die dritte Variante stellt umgekehrt den ungünstigen Grenzfall für eine durch die oberen Lagen im Behälterstapel dominierte Freisetzung dar.

Bei der Umsetzung in ein Berechnungsprogramm stellt Methode 1 die am einfachsten zu implementierende Variante dar. Bei einer großen Anzahl von zufällig verteilten Gebinden kann davon ausgegangen werden, dass sich über- und unterschätzende Annahmen des spezifischen Energieeintrages im Vergleich zu den Methoden 2 und 3 beim zu bildenden Summenwert der freigesetzten Nuklide teilweise ausgleichen. In Anbetracht der sonstigen groben Abschätzungen der Gesamtmethodik wird die Verwendung der Methode 1 als eine sachgerechte Näherung betrachtet.

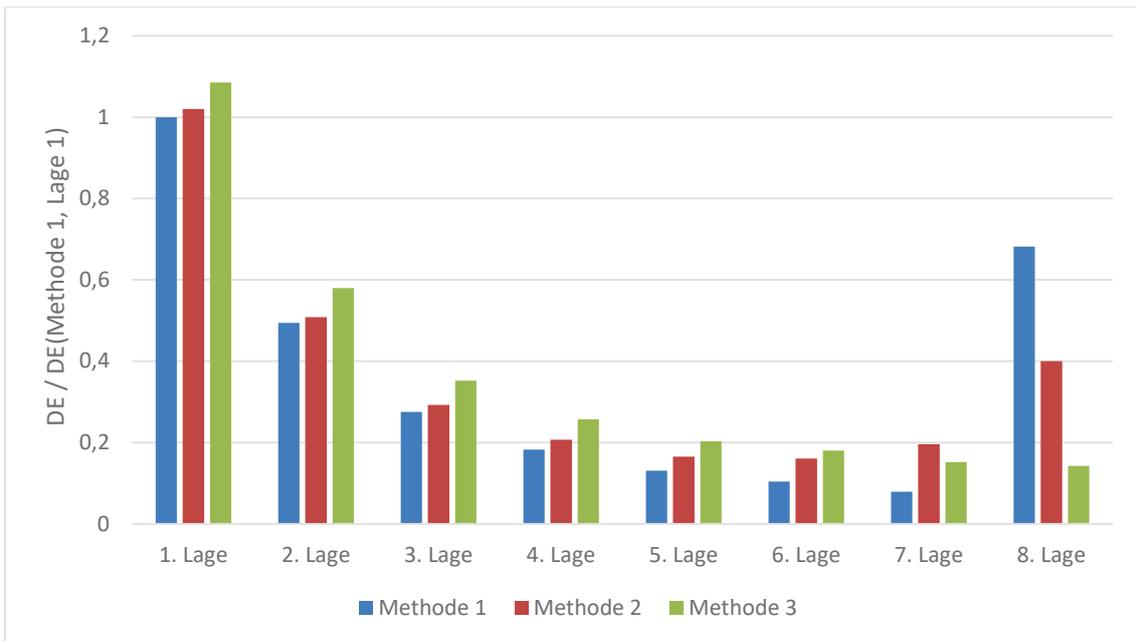


Abb. B.1 Verhältnis der mit verschiedenen Methoden der Behandlung der kinetischen Restenergie berechneten eingetragenen Deformationsenergie (DE) bezogen auf die in der 1. Lage mit Methode 1 berechnete Deformationsenergie

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

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