

Thema/Anlass

**Berechnung der potentiellen Strahlenexposition  
infolge von Störfällen im LasmAaZ (LasmAaZ)  
LAK/010/043**

08.01.2020	c
Datum	Revision

[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
Verfasser	AKZ	Tel.
[Redacted]		

Zusammenfassung    Textseiten 50    Anlagen 1

Die Kernkraftwerk Krümmel GmbH & Co. oHG hat am 13.12.2016 die Erteilung einer Genehmigung nach § 7 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen im Sinne des § 2 Abs. 3 Atomgesetz (AtG) beantragt. Nach heutigem Stand der Gesetzgebung wäre der Antrag nach § 12 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) vom 27.06.2017 erfolgt. Inhaltlich ergeben sich dadurch keine Änderungen. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen wurde der Sicherheitsbericht vorgelegt. Mit Fachberichten zum Sicherheitsbericht werden die Darstellungen im Sicherheitsbericht weiter vertieft.

Im nachfolgenden Bericht vom 19.12.2019 werden durch die Firma Brenk Systemplanung GmbH Störfälle aus dem radiologisch relevanten Ereignisspektrum für das geplante Lager bewertet und die potentielle Strahlenexposition für Personen der allgemeinen Bevölkerung in der Umgebung des Kernkraftwerks ermittelt.

Der Empfänger ist verpflichtet, diese Unterlage vertraulich zu behandeln. Eine Weitergabe ist nur mit Zustimmung des KKK zulässig.

	Geprüft	Geprüft	Geprüft	Freigegeben
Name:				
Abt. Kurzzeichen:				
Datum:				
Unterschrift:				

Verteiler (falls nur Zusammenfassung zur Kenntnisnahme: "z.K" anfügen):

intern: 14.01.2020  
LasmAaZ  
TKQ11  
TKE-Akte

extern:  
MELUND, Ref. 70  
ARGE SAK

02190044444 /0048



105 01	C	-			
AZK-01.01			FC	3	



Endbericht

**Berechnung der  
potentiellen Strahlenexposition  
infolge von Störfällen im LasmAaZ**

BS-Projekt-Nr. 1705-03  
Bestellung Nr. 8-4503751617

erstellt im Auftrag der  
Kernkraftwerk Krümmel GmbH & Co. oHG

■■■■■■■■■■  
■■■■■■■■■■

durch die  
Brenk Systemplanung GmbH

■■■■■■■■■■  
■■■■■■■■■■

Rev. 4, 19.12.2019

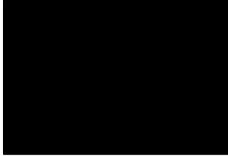


**Anmerkung:**

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (BS) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (KKK) übereinstimmen.






**AUTOREN**

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

- 
- 
- 

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

**ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE**

erstellt	geprüft	freigegeben
 Projektleiter	 Geschäftsbereichsleiter	 Geschäftsführung



## **ZUSAMMENFASSUNG**

Im vorliegenden Bericht werden Störfälle aus dem radiologisch relevanten Ereignisspektrum für das geplante Lager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (LasmAaZ) am Kernkraftwerk Krümmel (KKK) bewertet und die potentielle Strahlenexposition für Personen der allgemeinen Bevölkerung in der Umgebung des Kernkraftwerks ermittelt.

Dabei werden als Störfälle

- der Absturz eines Containers auf weitere Container im LasmAaZ und
- ein Brand in einem Container im Handhabungsbereich des LasmAaZ

betrachtet.

Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen erfolgen in Übereinstimmung mit den Vorgaben des Kapitels 4 der Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV<sup>2001</sup>, da für die Anwendung von § 104 StrlSchV noch keine Allgemeine Verwaltungsvorschrift als Berechnungsgrundlage vorliegt. Es werden 6 Altersklassen berücksichtigt.

Als radiologisch abdeckendes Ereignis für den in diesem Bericht betrachteten Teilumfang an Szenarien ergibt sich der Brand eines Containers im Handhabungsbereich, für den mit einer maximalen potentiellen effektiven Folgedosis von 0,92 mSv (in der Altersklasse der Säuglinge) die Planungswerte gemäß § 104 StrlSchV in Verbindung mit § 194 StrlSchV (entsprechend § 50 StrlSchV<sup>2001</sup> in Verbindung mit § 117 Abs. 16 StrlSchV<sup>2001</sup>) eingehalten werden. Ebenso werden die Planungswerte für alle Organdosen eingehalten.

## INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

<b>1. AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2. BERECHNUNGS- UND BEWERTUNGSGRUNDLAGEN .....</b>	<b>1</b>
<b>2.1. Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Freisetzungsteile .....</b>	<b>4</b>
2.2.1. Freisetzungsteile nach Transportstudie Konrad .....	4
2.2.2. Freisetzungsteile nach NDA .....	7
2.2.3. Nutzung der Freisetzungsteile in diesem Bericht .....	10
<b>2.3. Ausbreitungsmodell .....</b>	<b>10</b>
2.3.1. Meteorologische Parameter .....	11
2.3.2. Ablagerungsfaktoren .....	11
2.3.3. Gelände- und Gebäudeeinfluss .....	12
2.3.4. Quellüberhöhung .....	13
<b>2.4. Dosisberechnung .....</b>	<b>13</b>
2.4.1. Expositionspfade .....	14
2.4.2. Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen .....	14
2.4.2.1. Lebensmittelverzehr zur Berücksichtigung bei Auslegungsfällen .....	14
2.4.2.2. Atemraten .....	15
2.4.2.3. Expositionszeiten bei Störfällen .....	16
2.4.3. Dosiskoeffizienten .....	16
<b>2.5. Bewertungsmaßstab für Störfälle .....</b>	<b>16</b>
2.5.1. Planungswerte für die Dosis .....	16
2.5.2. Ungünstigste Aufpunkte .....	17
<b>3. STANDORTGEGEBENHEITEN .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Lage und Gebäude .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigster Aufpunkt .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Nuklidvektoren .....</b>	<b>20</b>
3.3.1. Nuklidvektor Aktivierung .....	20
3.3.2. Nuklidvektor Kontamination .....	20
<b>3.4. Aktivitätsinventar .....</b>	<b>21</b>
<b>3.5. Störfälle .....</b>	<b>24</b>
3.5.1. Absturz eines Gebindes .....	24
3.5.2. Brand eines Gebindes .....	25
<b>4. DOSISBERECHNUNGEN .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1. Absturz eines Gebindes .....</b>	<b>26</b>



<b>4.1.1. Quelltermmittlung .....</b>	<b>26</b>
4.1.1.1. Betroffenes Inventar .....	26
4.1.1.2. Freigesetzte Aktivität .....	26
<b>4.1.2. Ausbreitungsberechnung .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.3. Ergebnisse der Dosisberechnung .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2. Brand eines Gebindes .....</b>	<b>32</b>
4.2.1. Quelltermmittlung .....	32
4.2.1.1. Betroffenes Inventar .....	32
4.2.1.2. Freigesetzte Aktivität .....	32
4.2.2. Ausbreitungsberechnung .....	33
4.2.3. Ergebnisse der Dosisberechnung .....	34
<b>4.3. Bewertung .....</b>	<b>37</b>
<b>5. QUELLEN .....</b>	<b>38</b>

## TABELLENVERZEICHNIS

Seite:

Tabelle 2-1:	Zuordnung zwischen Abfallproduktgruppe (APG) nach [BFS 14] und Abfallgebindegruppe (AGG) nach [GRS 17].....	5
Tabelle 2-2:	Belastungsklassen für rein mechanische Beschädigungen in der Transportstudie Konrad [GRS 17] mit Angabe der Absturzhöhe eines Gebindes, die der Geschwindigkeit entspricht (in Klammer sind die thermisch/mechanischen Belastungsklassen aufgeführt).....	5
Tabelle 2-3:	Partikelgrößenabhängige Freisetzungsteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe aus [GRS 17].....	6
Tabelle 2-4:	Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], hier relevante Gruppen und Elemente sind fett dargestellt.....	8
Tabelle 2-5:	Temperaturabhängige Freisetzungsfaktoren für exemplarische Abfallarten und Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], keine Gebinderückhaltung.....	9
Tabelle 2-6:	Freisetzungsteile nach [SER 10] für die betrachteten Gebindearten und die hier relevante Flüchtigkeitsgruppen bei einem einstündigen Brand mit 1000 °C.....	10
Tabelle 2-7:	Jahresverbrauch an Lebensmitteln der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Ingestion nach [SSK 03], Mengen in kg/a.....	15
Tabelle 2-8:	Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [SSK 03].....	15
Tabelle 2-9:	Planungswerte für Effektivdosis und Organdosen § 104 Absatz 1 StrlSchV bei einem Störfall.....	17
Tabelle 3-1:	Entfernung der Begrenzung des Betriebsgeländes in den 12 Sektoren in m (auf 10 m gerundet).....	20
Tabelle 3-2:	Nuklidvektoren für Kontamination.....	21
Tabelle 3-3:	Zur Einlagerung im LasmAaZ vorgesehene Behältertypen nach [NIS 13].....	21
Tabelle 3-4:	Störfallgrenzwerte nach Einlagerungsbedingungen Konrad [BFS 14] sowie resultierende Maximalaktivitäten für eine Summenwert = 1 bei Verwendung des Nuklidvektors für Kontamination.....	23
Tabelle 3-5:	Verwendetes maximales Nuklidinventar pro Gebinde. Konservativ wird von einem Störfallsummenwert = 1 ausgegangen.....	24
Tabelle 4-1:	Potentiell von einem Gebindeabsturz im LasmAaZ betroffene Aktivität. Dabei wird von 3 betroffenen Gebinden ausgegangen. ....	26



Tabelle 4-2:	Potentiell bei einem Gebindeabsturz im LasmAaZ freigesetzte Aktivität.....	28
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung beim Absturz eines Containers im LasmAaZ.....	29
Tabelle 4-4:	Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung beim Absturz eines Containers im LasmAaZ .....	30
Tabelle 4-5:	Potentielle Organdosis am ungünstigsten Aufpunkt beim Absturz eines Containers im LasmAaZ für die am höchsten belastete Altersklasse bis 1 Jahr.....	31
Tabelle 4-6:	Potentiell bei einem Brand freigesetzte Aktivität.....	33
Tabelle 4-7:	Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung beim Brand eines Gebindes im LasmAaZ.....	34
Tabelle 4-8:	Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung beim Brand eines Gebindes im LasmAaZ.....	35
Tabelle 4-9:	Potentielle Organdosis am ungünstigsten Aufpunkt beim Brand eines Gebindes im LasmAaZ für die am höchsten belastete Altersklasse bis 1 Jahr .....	36





**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Seite:

Abbildung 3-1:	Kernkraftwerk Krümmel, Fotografie vom gegenüberliegenden Elbufer .....	18
Abbildung 3-2:	KKK-Gelände mit geplantem Anlagenzaun (rot), Betriebsgelände (grün) und Sektoreneinteilung (erstellt auf Basis von Google Earth™ Pro Kartenservice Material) .....	19



## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

ABK	Abfallbehälterklasse
AED	aerodynamisch äquivalenter Partikeldurchmesser (aerodynamic equivalent diameter)
AGG	Abfallgebindegruppe
APG	Abfallproduktgruppe
ARF	luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)
ARTM	Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell
AtG	Atomgesetz (Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren)
BK	Belastungsklasse
BS	Brenk Systemplanung GmbH
BSSBG	Computerprogramm der Firma Brenk Systemplanung GmbH (BS) zur Umsetzung der Berechnungsvorschriften der Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV <sup>2001</sup> , Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition.
DR	beschädigter Anteil (damage ratio)
KC	Konrad-Container
KKK	Kernkraftwerk Krümmel
LasmAaZ	Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle am Zwischenlager
LPF	zur Ausbreitung gelangender Anteil (leakpath factor)
MR	betroffenes Inventar (material at risk)
RF	einatembarer Anteil bzw. Anteil der zur Exposition beiträgt (respirable fraction)
SBG	Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV <sup>2001</sup>
ST	Freisetzungsterm (source term)
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV <sup>2001</sup>	Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001, zuletzt geändert am 27. Januar 2017
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SZK	Standort-Zwischenlager Krümmel

## **1. AUFGABENSTELLUNG**

Das Kernkraftwerk Krümmel (KKK) nahm am 28.03.1984 den kommerziellen Leistungsbetrieb auf. Mit Inkrafttreten der 13. Atomgesetz-Novelle am 6. August 2011 [ATG 11] ist für KKK die Berechtigung zum Leistungsbetrieb erloschen. Am 24.08.2015 wurde bei der zuständigen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde (AGAB) der Antrag auf Stilllegung und Abbau des KKK gestellt [KKK 15].

Die gegenwärtige Planung sieht vor, nördlich des Standort-Zwischenlagers Krümmel (SZK) ein Lager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (LasmAaZ) zu errichten. Dort sollen Gebinde in einem Zustand eingelagert werden, so dass eine Abgabe an ein Bundesendlager grundsätzlich möglich ist. Am 13.12.2016 wurde für das LasmAaZ ein Antrag auf Erteilung einer Genehmigung gemäß § 7 StrlSchV<sup>2001</sup> [SSV 17] zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen im Sinne des § 2 Abs. 3 Atomgesetz (AtG) [ATG 17] gestellt [KKK 16].

Gemäß § 104 StrlSchV [SSV 18] in Verbindung mit § 194 StrlSchV (entsprechend § 50 StrlSchV<sup>2001</sup> [SSV 17] in Verbindung mit § 117 Abs. 16 StrlSchV<sup>2001</sup>) ist für solche Anlagen Vorsorge zu treffen, um die Strahlenexposition bei Störfällen durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung zu begrenzen.

Im vorliegenden Bericht werden daher potentielle ereignisbedingte Strahlenexpositionen aufgrund von Auslegungsstörfällen im LasmAaZ ermittelt. Bei den Ereignissen werden

- der Absturz eines Containers auf weitere Container und
- der Brand eines Containers

betrachtet und in Bezug auf Einhaltung der Störfallplanungswerte beurteilt.

## **2. BERECHNUNGS- UND BEWERTUNGSGRUNDLAGEN**

In § 2 StrlSchG [SSG 17] erfolgt eine Unterscheidung der Situationen, in denen eine Strahlenexposition erfolgen kann in:

- Geplante Expositionssituationen: Entstehen durch Tätigkeiten, in denen eine Exposition verursacht wird oder verursacht werden kann.
- Notfallexpositionssituationen: Entstehen durch einen Notfall, solange die Situation nicht unter „bestehende Expositionssituation“ eingeordnet werden kann.
- Bestehende Expositionssituationen: Besteht bereits, wenn eine Entscheidung über ihre Kontrolle getroffen werden muss.

Die Definition des Begriffs „Notfall“ erfolgt in § 5 StrlSchG als „Ereignis, bei dem sich durch ionisierende Strahlung erhebliche Auswirkungen auf Menschen, die Umwelt oder Sachgüter ergeben können. Kein Notfall liegt vor, wenn abzusehen ist, dass ein Ereignis, das im Rahmen einer geplanten Tätigkeit eingetreten ist, voraussichtlich durch die für geplante Expositionssituationen geregelten Maßnahmen bewältigt werden kann.“ In § 1 StrlSchV [SSV 18] erfolgt zur genaueren Beschreibung die Einführung des Begriffes „Störfall“ als „Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb

*der kerntechnischen Anlage, der Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung oder die Tätigkeit aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für den die kerntechnische Anlage oder die Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung auszulegen ist oder für den bei der Tätigkeit vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen sind.“*

§ 104 StrlSchV fordert die Begrenzung der Exposition in der Umgebung der Anlage durch Freisetzungen radioaktiver Stoffe bei Störfällen. Für Störfälle in oder an einem Kernkraftwerk, das der Erzeugung von Elektrizität dient, werden in Absatz 1 maximale Werte für die resultierende Körperdosis festgelegt. Diese gelten nach § 104 Absatz 2 StrlSchV auch für die Aufbewahrung bestrahlter Kernbrennstoffe an den Standorten sowie für Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Die Absätze 3 und 4 in § 104 StrlSchV regeln die Begrenzung der Exposition durch Störfälle in anderen als in § 104 Absatz 1 und 2 aufgeführten Anlagen. Hierzu zählen auch Schutzmaßnahmen zur Begrenzung der Exposition bei „Planung der Stilllegung, des sicheren Einschlusses der endgültig stillgelegten Anlagen und des Abbaus der Anlagen oder von Anlagenteilen nach § 7 Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes... Die Genehmigungsbehörde legt Art und Umfang der Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung des Einzelfalls, insbesondere des Gefährdungspotenzials der Anlage und der Wahrscheinlichkeit des Eintritts des Störfalls, fest“.

Nach § 104 Absatz 6 StrlSchV erlässt die Bundesregierung „mit Zustimmung des Bundesrates Allgemeine Verwaltungsvorschriften, in denen die Schutzziele zur Störfallvorsorge nach den Absätzen 3 und 4 festgelegt werden.“ Diese Allgemeinen Verwaltungsvorschriften liegen bisher nicht vor.

In § 194 StrlSchV wird als Übergangsvorschrift festgelegt: „Bis zum Inkrafttreten Allgemeiner Verwaltungsvorschriften zur Störfallvorsorge nach § 104 Absatz 6 ist bei Planung der in § 104 Absatz 3 und 4 genannten Anlagen und Einrichtungen die Störfallexposition so zu begrenzen, dass die durch Freisetzung durch radioaktive Stoffe in die Umgebung verursachte Dosis von 50 Millisievert nicht überschritten wird.“ Eine Formulierung dieser Art gibt es auch in § 117 Abs. 16 der bis 2018 gültigen Strahlenschutzverordnung (StrlSchV<sup>2001</sup>), hierfür gab es allerdings nie eine entsprechende Allgemeine Verwaltungsvorschrift (für Anlagen nach § 50 StrlSchV<sup>2001</sup>). Für die entsprechenden Berechnungen wurde daher Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlage (SBG) [SSK 03] zu § 49 StrlSchV<sup>2001</sup> unter Berücksichtigung des Dosisgrenzwertes nach § 117 Abs. 16 StrlSchV<sup>2001</sup> zugrunde gelegt.

In Anlehnung dazu können daher die Störfallberechnungen nach Kapitel 4 der SBG zu § 49 StrlSchV<sup>2001</sup> unter Berücksichtigung des Dosisgrenzwertes von 50 mSv nach § 117 Abs. 16 StrlSchV<sup>2001</sup> (der auch dem Wert nach § 194 StrlSchV entspricht) durchgeführt werden.

Nachfolgend werden die in diesem Bericht verwendeten Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen dargestellt. Die Berechnung der potentiellen Exposition kann dabei in die drei Einzelschritte

- Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung (Quelltermbestimmung),
- Ausbreitungsberechnung und
- Dosisberechnung

gegliedert werden. Die Szenarien „Absturz eines Containers“ und „Brand eines Containers“ sind dabei als Störfälle im Sinne von § 104 StrlSchV in Verbindung mit § 194 StrlSchV (entsprechend § 50 StrlSchV<sup>2001</sup> in Verbindung mit § 117 Abs. 16 StrlSchV<sup>2001</sup>) einzuordnen.

## **2.1. Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung**

Im Folgenden wird ein Formalismus zur Ermittlung der Material- bzw. Aktivitätsfreisetzung beschrieben, wie er z. B. in [NRC 98] und [DOE 06] angewendet wird:

$$ST = MR \cdot DR \cdot ARF \cdot RF \cdot LPF \quad (G 2-1)$$

wobei die Symbole folgende Bedeutung haben:

- ST*: Freisetzungsterm (source term) in Bq,
- MR*: betroffenes Inventar (material at risk) in Bq,
- DR*: beschädigter Anteil (damage ratio),
- ARF*: luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction),
- RF*: einatembarer Anteil bzw. Anteil der zur Exposition beiträgt (respirable fraction) und
- LPF*: zur Ausbreitung gelangender Anteil (leakpath factor).

Der Freisetzungsterm (*ST*) beschreibt dabei die Menge der freigesetzten Aktivität. Das betroffene Inventar (*MR*) gibt den Teil des Gesamtinventars an, der beim Szenario gefährdet ist, der Faktor *DR* beschreibt den beim Ereignis beschädigten Anteil. Je nach Szenario werden die Faktoren *MR* und *DR* einzeln (z. B. in dem Fall, dass sich in einem Gebäude sehr viele Gebinde mit einer Gesamtaktivität *MR* befinden, von denen ein bestimmter Anteil *DR* vom Ereignis betroffen ist) oder als Produkt (ein Ereignis betrifft ein bestimmtes Gebinde) ermittelt. Insbesondere ist hier darauf zu verweisen, dass gemäß [BMI 83], Abschnitt 2.1.3 folgende Vorgehensweise anzuwenden ist:

*„Nicht festgeschriebene Parameter für die Berechnung der Aktivitätsfreisetzung, deren Werte stark streuen können, müssen konservativ abgeschätzt werden, oder sie dürfen unter Beachtung der folgenden Bedingungen anhand ihrer beobachteten Häufigkeitsverteilung festgesetzt werden:*

*Es müssen gesicherte Verteilungsfunktionen der Parameter vorliegen; dazu gehört auch die Gewinnung der Meßwerte in einer repräsentativen zeitlichen Verteilung.*

*Die für die Berechnung der Aktivitätsfreisetzung zugrunde gelegten Werte der Parameter müssen 95% der Verteilung der Meßwerte abdecken.“*

Der Faktor *ARF* gibt an, welcher Anteil des vom Szenario betroffenen Aktivitätsinventars (*MR* · *DR*) als luftgetragene Aerosole in das Innere des Gebäudes freigesetzt wird. Hierbei sind die Art (thermisch oder mechanisch) und Stärke der Einwirkungen, die stofflichen Eigenschaften der betroffenen Aktivitäten sowie die Rückhaltewirkungen der jeweiligen Gebinde zu berücksichtigen.

Der Faktor *RF* gibt den Anteil des in der Gebäudereststruktur freigesetzten Inventars an, der lungengängig ist. Er charakterisiert damit die beim Störfall entstehende Größenverteilung der Aerosole. Der Faktor *RF* wird hier für die Ermittlung der Freisetzungsterme zu 1 gesetzt, da auch Expositionspfade (z. B.  $\gamma$ -Bodenstrahlung) betrachtet werden, bei denen die Lungengängigkeit der Aerosole nicht relevant ist und diese den Hauptbeitrag zur Dosis darstellen. Zur Ermittlung der Exposition durch Inhalation werden jedoch nur die Anteile an den Freisetzungstermen berücksichtigt, die sich

auf Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von maximal 10 µm beziehen, da diese lungengängig sind [DIN 93]. Das heißt, bei der Ermittlung der Dosis durch Inhalation wird der Faktor  $RF$  berücksichtigt.

Der Faktor  $LPF$  gibt den Anteil des in der Gebäudereststruktur freigesetzten Inventars an, der in die Umgebung freigesetzt wird. Er charakterisiert damit die Rückhaltewirkung von Filtern und der Gebäudestruktur. Dieser Faktor wird im Allgemeinen für verschiedene aerodynamische Durchmesser der in die Gebäudestruktur freigesetzten Aerosole unterschiedlich ermittelt.

Erfolgt die Freisetzung der im Gebäude befindlichen Aktivität durch Gebäudeundichtigkeiten oder ungefiltert über eine Lüftung, kann berücksichtigt werden, dass ein Teil der Aerosole an Gebäudeflächen abgelagert wird. Dies erfolgt sowohl am Boden des Gebäudes (schwerkraftbedingtes Absinken der Partikel) als auch an den sonstigen Oberflächen im Gebäude (Diffusion zu den Oberflächen und adsorptive Bindung an der Oberfläche).

In [MCC 07] wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem ein  $LPF$ -Wert (schwerkraftbedingter Anteil) anhand der Gebäudefläche  $A$ , der Lüftungsrate  $Q$  und der Absinkgeschwindigkeit  $v_d$  der Partikel ermittelt werden kann.

$$LPF = \frac{1}{1 + \frac{v_d \cdot A}{Q}} \quad (G\ 2-2)$$

Verwendet man statt der Lüftungsrate  $Q$  die auf das Volumen  $V$  bezogene Luftaustauschrate  $q$  ( $q = Q/(V \cdot f)$ ), die Gebäudehöhe  $h$  (mit  $A = V/h$ ), den Anteil  $f$  des freien Volumens im Gebäude und die Absinkgeschwindigkeit  $v_d$ , so ergibt sich:

$$LPF = \frac{1}{1 + \frac{v_d}{q \cdot h \cdot f}} \quad (G\ 2-3)$$

Details zur Ermittlung der Aktivitätsfreisetzung werden in Abschnitt 4.1.1 beschrieben.

## **2.2. Freisetzungsteile**

### **2.2.1. Freisetzungsteile nach Transportstudie Konrad**

In der Transportstudie Konrad [GRS 09] (Aktualisierung in [GRS 17]) wurden Freisetzungsteile durch mechanische Belastungen sowie durch Folgenbrände bei Transportunfällen betrachtet.

Die Art des betroffenen Gebindes und die Struktur des Inhalts wird durch die in Tabelle 2-1 aufgeführten Abfallgebindegruppen (AGG) beschrieben. In den Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle für das Endlager Konrad [BFS 14] werden Abfallproduktgruppen definiert. Diese können gemäß [GRS 17], wie ebenfalls in Tabelle 2-1 angegeben, den Abfallgebindegruppen zugeordnet werden.

Tabelle 2-1: Zuordnung zwischen Abfallproduktgruppe (APG) nach [BFS 14] und Abfallgebindergruppe (AGG) nach [GRS 17]

AGG	Behältertyp	ABK	Abfallart	APG
1	Stahlblechcontainer	I	Brennbare, unfixierte Abfälle	01
2	Stahlblechcontainer oder Betonbehälter	I	Unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nicht-metallische Abfälle (einschließlich Verdampferkonzentraten)	02
3	Stahlblechcontainer oder Betonbehälter	I	Metallische Abfälle	03
4	Stahlblechcontainer oder Betonbehälter	I	Kompaktierte Abfälle	04
5	Stahlblechcontainer	I	Zementfixierte Abfälle	05
6	Betonbehälter	I	Brennbare, unfixierte Abfälle	01 – 04
7	Betonbehälter	I	Zementfixierte Abfälle	05
8	Gussbehälter	II	beliebig	01 – 05

Die mechanischen Belastungen werden in [GRS 17] anhand der Aufprallgeschwindigkeiten bei den unterstellten Transportunfällen untergliedert. Der Energieeintrag der mechanischen Einwirkungen wird in [GRS 17] durch die in Tabelle 2-2 angegebenen Geschwindigkeitsklassen charakterisiert. Für die in Klammern aufgeführten Belastungsklassen treten zusätzlich zu den mechanischen Belastungen noch thermische Belastungen auf.

Tabelle 2-2: Belastungsklassen für rein mechanische Beschädigungen in der Transportstudie Konrad [GRS 17] mit Angabe der Absturzhöhe eines Gebindes, die der Geschwindigkeit entspricht (in Klammer sind die thermisch/mechanischen Belastungsklassen aufgeführt)

Belastungsklasse	Aufprallgeschwindigkeit [km/h]	unterstellte Geschwindigkeit [km/h] (in Klammern [m/s])	korrespondierende Fallhöhe [m]
BK 1 (BK 2, BK 3)	≤ 35	35 (9,7)	4,8
BK 4 (BK 5, BK 6)	36 – 80	80 (22)	25,2
BK 7 (BK 8, BK 9)	> 80	110 (31)	47,6

Für den hier betrachteten Fall des Absturzes eines Flugzeuges kann aus dem Verhältnis der kinetischen Energie des Flugzeuges beim Aufprall auf die Gebinde mit der Referenzenergie der jeweiligen Belastungsklasse (aus Gebindemasse und Aufprallgeschwindigkeit nach Tabelle 2-2) die maximale Anzahl der betroffenen Gebinde bestimmt werden.

Die in [GRS 09] betrachteten Brände beziehen sich auf einen 30-minütigen (BK 2, BK 5, BK 8) bzw. 60-minütigen (BK 3, BK 6, BK 9) Folgebrand, wobei die unterschiedlichen Nummern sich auf die verschiedenen mechanischen Belastungsklassen beziehen.

Die Freisetzungsteile nach [GRS 17] für die verschiedenen Belastungsklassen und Abfallgebindergruppen sind in Tabelle 2-3 für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) aufgeführt.

Tabelle 2-3: Partikelgrößenabhängige Freisetzungsteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindergruppe aus [GRS 17]

BK	AED/ $\mu\text{m}$	AGG 1	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 6	AGG 7	AGG 8
BK 1	$\leq 10$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
	$> 10$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 2	$\leq 10$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	$> 10$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 3	$\leq 10$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	$> 10$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
BK 4	$\leq 10$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0
	$> 10$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 5	$\leq 10$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	$> 10$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 6	$\leq 10$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
	$> 10$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
BK 7	$\leq 10$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
	$> 10$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0
BK 8	$\leq 10$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
	$> 10$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0
BK 9	$\leq 10$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	$> 10$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0

Die Freisetzungsteile gemäß [GRS 09] beziehen sich für Belastungsklassen mit Brand ausdrücklich auf das leichtflüchtige Element Cäsium (siehe auch [GRS 13]). Dies führt beispielsweise zu einer deutlichen Überschätzung der Freisetzung von Aktivierungsprodukten wie Co-60 oder Transuranen wie Plutonium und Americium. Daher sind hier für andere Elemente gegebenenfalls Korrekturen notwendig. Solche werden in [GRS 17] nicht durchgeführt, da es nicht möglich ist, alle relevanten Kombinationen an Nukliden, chemischen Verbindungen, Konditionierungsarten, Abfallgebinder und möglichen thermischen Belastungen durch experimentelle Untersuchungen abzudecken und daher die Freisetzungsteile in vielen Fällen nur über Modellannahmen und Extra- oder Interpolationen bestimmt werden können.

Unter Beachtung der im folgenden Abschnitt 2.2.2 diskutierten Ergebnisse aus [SER 10] zur unterschiedlichen Freisetzbarkeit einzelner chemischer Elemente wird im Weiteren als konservativ abde-



ckende Vorgehensweise ein Korrekturfaktor für die thermische Freisetzung der Elemente Kobalt, Americium und Strontium von 0,1 gegenüber der thermischen Freisetzung von Cäsium<sup>1</sup> angewandt.

Je nach Abfallgebindegruppe und Belastungsklasse werden in [GRS 17] Freisetzungsteile  $ARF \cdot RF$  für die Freisetzung von H-3, C-14, Halogene und sonstigen Nukliden (als Aerosole) angegeben. Für Aerosole werden dabei zwei Größenklassen unterschieden: Aerosole mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser bis einschließlich 10  $\mu\text{m}$  und Aerosole mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser  $> 10 \mu\text{m}$ .

Nach [DIN 93] sind Partikel bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von maximal 10  $\mu\text{m}$  lungengängig. Daher wird für Aerosole mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser  $\leq 10 \mu\text{m}$  in diesem Bericht angenommen, dass diese komplett zur Dosis durch Inhalation ( $RF = 1$ ) beitragen. Bei Aerosolen mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser (AED)  $> 10 \mu\text{m}$  wird dagegen kein Beitrag zur Dosis durch Inhalation ( $RF = 0$ ) angenommen. Für die übrigen betrachteten Expositionspfade (siehe Abschnitt 2.4.1) erfolgt der Beitrag unabhängig von der Größe der Aerosole ( $RF = 1$ ), wobei aber verschiedene Ablagerungsparameter in Abhängigkeit des aerodynamischen Partikeldurchmessers zu berücksichtigen sind (siehe Abschnitt 2.3.2).

### **2.2.2. Freisetzungsteile nach NDA**

Mit [SER 10] liegt ein für die Nuclear Decommissioning Authority (NDA, UK) verfasster Bericht vor, in dem die Freisetzung aus Abfallgebinden aufgrund thermischer Belastungen untersucht wird. Dabei wird von einer einstündigen Einwirkung einer Temperatur von 1000°C ausgegangen. Weiterhin werden die chemischen Elemente entsprechend ihrer Flüchtigkeit in sechs Gruppen eingeteilt, wobei die Flüchtigkeit mit höherer Gruppennummer abnimmt. In Gruppe I sind z. B. Elemente zu finden, die elementar (z. B. Edelgase oder Iod) oder in ihrer üblichen anzutreffenden Bindungsform (z. B. H als H<sub>2</sub>O) bei Umgebungstemperaturen bzw. moderaten Erwärmungen gasförmig vorliegen. Gruppe II umfasst Elemente, die bei stärkeren Erwärmungen gasförmig werden bzw. gasförmige Verbindungen eingehen. Hier ist insbesondere auch das Element Cäsium (Cs) eingeordnet. Weitere, für diesen Bericht relevante Elemente sind dagegen in den weniger flüchtigen Gruppen IV und V eingeordnet. Diese Einteilung ist in Tabelle 2-4 zusammengestellt.

---

<sup>1</sup> Mit diesen Korrekturfaktoren werden höhere potentielle Freisetzungen berechnet als mit den in [SER 10] realistisch ermittelten Korrekturfaktoren.

Tabelle 2-4: Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], hier relevante Gruppen und Elemente sind fett dargestellt

<b>Flüchtigkeits- gruppe</b>	<b>Elemente</b>
I	Ar, As, At, Br, C, Cl, F, H, He, Hg, I, Kr, N, Ne, O, P, Rn, S, Se, Xe
<b>II</b>	B, Bi, Cd, <b>Cs</b> , Fr, Ge, In, K, Li, Na, Os, Po, Rb, Re, Sb, Sn, Tc, Te, Tl
III	Ag, Ba, Be, Ga, Mo, Pb, Ra, Ru, W, Zn
<b>IV</b>	Al, Au, Ca, <b>Co</b> , Cr, Cu, Eu, <b>Fe</b> , La, Mg, Mn, <b>Ni</b> , Pd, <b>Sr</b> , U, V
<b>V</b>	Ac, <b>Am</b> , Bk, Ce, Cf, Cm, Es, Fm, Lr, Md, Nd, No, Np, Pu, Rh, Si, Y, Zr
VI	Db, Dy, Er, Gd, Hf, Ho, Ir, Lu, Nb, Pa, Pm, Pr, Pt, Rf, Sc, Sm, Ta, Tb, Th, Ti, Tm, Yb

Ausgehend von temperaturabhängigen Freisetzungsraten verschiedener Abfallarten (ohne Rückhaltungswirkung von Gebinden) wird in [SER 10] die Freisetzungsrate aus Gebinden bestimmt, indem für unterschiedliche Gebinde (500-l-Fässer, diverse quaderförmige Gebinde) die Erwärmung des Gebindeinhalts simuliert wird. Dabei wird von einem allseitigen Brand mit einer Temperatur von 1000°C ausgegangen, der eine Stunde andauert. Für die Gebinde wird bei unterschiedlichen Zusammensetzungen des Inhalts (z. B. homogen, heterogen oder verschiedene Stoffform und Konsistenz) die Temperaturverteilung im Gebinde berechnet und daraus der totale Freisetzungsanteil für das Gebinde ermittelt.

In Tabelle 2-5 sind exemplarisch die temperaturabhängigen Freisetzungsanteile für einige Abfallarten aufgeführt (schlammartige Abfallformen, nicht vergossene Metalle und Abfälle niedriger Aktivität, jeweils ohne Gebinderückhaltung). Dabei führt die Betrachtung schlammartiger Abfallformen (auch im Vergleich zu den hier nicht aufgeführten Abfallarten) zu den höchsten Freisetzungsanteilen. Diese Ergebnisse charakterisieren die stofflichen Freisetzungseigenschaften und beziehen sich auf das Vorliegen des Stoffes ohne Gebinde.

Tabelle 2-5: Temperaturabhängige Freisetzungsfaktoren für exemplarische Abfallarten und Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], keine Gebinderückhaltung

Flüchtigkeitsgruppe	Freisetzungsfaktoren für schlammartige Abfallformen bei einer Temperatur von					
	< 50°C	50°C	300°C	1000°C		
II	0	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-1}$		
IV	0	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$		
V	0	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$		
Flüchtigkeitsgruppe	Freisetzungsfaktoren für nicht vergossene metallische Abfälle bei einer Temperatur von					
	< 50°C	50°C	300°C	450°C	> 450°C	
II	0	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	Extrapolation der Abhängigkeit zwischen 300°C und 450°C	
IV	0	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$		
V	0	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$		
Flüchtigkeitsgruppe	Freisetzungsfaktoren für kompaktierte Abfälle geringer Aktivität bei einer Temperatur von					
	< 50°C	50°C	150°C	450°C	700°C	1000°C
II	0	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
IV	0	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
V	0	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Ausgehend von den Freisetzungsfaktoren ohne jegliche Gebinderückhaltung für die verschiedenen Abfallarten wird in [SER 10] eine Berechnungsgrundlage für die jeweiligen Freisetzungsteile aus verschiedenen Gebinden gegeben.

Die gemäß [SER 10] berechneten resultierenden Freisetzungsteile für die betrachteten Gebindearten bei dem einstündigen Brand mit einer Temperatur von 1000 °C sind in Tabelle 2-6 zusammengestellt.

Tabelle 2-6: Freisetzunganteile nach [SER 10] für die betrachteten Gebindearten und die hier relevante Flüchtigkeitsgruppen bei einem einstündigen Brand mit 1000 °C

Abfallgebinde	Freisetzunganteil für Flüchtigkeitsgruppe (relevante Elemente)		
	II (Cs)	IV (Co, Sr, Fe, Ni)	V (Am)
Endlagercontainer	0	0	0
500-l-Fass (homogen)	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
500-l-Fass (heterogen)	$9 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
500-l-Fass (vergossen)	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$
3 m <sup>3</sup> Box	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
3 m <sup>3</sup> Fass	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
MBGWS Box	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
2 m und 4 m Box	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
WAGR Box	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Für Cäsium (Flüchtigkeitsgruppe II) ergeben sich maximale Freisetzunganteile von  $3 \cdot 10^{-2}$  (500-l-Fass mit homogen verteiltem Inhalt). In allen Fällen liegen die Freisetzunganteile für Co, Sr, Fe, Ni (alle Flüchtigkeitsgruppe IV) und Am (Flüchtigkeitsgruppe V) um mindestens einen Faktor 10 unter den jeweiligen Freisetzunganteilen für Cs.

### **2.2.3. Nutzung der Freisetzunganteile in diesem Bericht**

Bei den Betrachtungen in diesem Bericht werden die Freisetzunganteile aus der Transportstudie Konrad [GRS 09] für die jeweilige Abfallgebindegruppe und Belastungsklasse verwendet. Im Falle einer durch thermische Belastung verursachten Freisetzung werden die Freisetzunganteile aus der Transportstudie Konrad für Partikel mit einem AED bis 10 µm für andere Nuklide als Cs mit einem Faktor 0,1 korrigiert. Dieser Korrekturfaktor ist konservativer als die in Abschnitt 2.2.2 erläuterten Werte und somit abdeckend.

Nach [GRS 13] wurde bei der Herleitung der mechanischen Freisetzunganteile in [GRS 09] (und damit auch in [GRS 17]) von einem Container des Typs IV ausgegangen. Da die mechanischen Freisetzunganteile mit der Behältergröße skalieren ( $\propto V^{-\frac{2}{3}}$ ), wird im Folgenden für die Konradcontainer ein Skalierungsfaktor  $\left(\frac{V(KC\ IV)}{V(KC)}\right)^{\frac{2}{3}}$  verwendet. Für Container des Typs II, der von den verwendeten das geringste Volumen besitzt, ergibt sich somit ein Korrekturfaktor 1,37.

### **2.3. Ausbreitungsmodell**

Gemäß [SSK 03] ist bei der Ermittlung der Strahlenexposition für atmosphärische Ausbreitungsrechnungen das Gauß-Fahnenmodell zugrunde zu legen. Berechnungsvorschriften und Parametrisierungen des Gauß-Fahnenmodells sind in [SSK 03], Abschnitt 4.4 sowie Anhang 2 bis 10 aufgeführt.

Die Ausbreitungsberechnung liefert als Ergebnis Ausbreitungsfaktoren, Washoutkoeffizienten und Ausbreitungsfaktoren für die  $\gamma$ -Submersion an allen vorgegebenen Aufpunkten.

Die Berechnung der Ausbreitungs- und Ablagerungsfaktoren und der Dosiswerte erfolgt in einem polaren Koordinatensystem mit einer Unterteilung in 12 Sektoren von jeweils 30° Breite, dessen Ursprung am Fußpunkt des Emissionsortes liegt. Die Sektoren werden im Uhrzeigersinn nummeriert, beginnend bei 1 für den Sektor 345° bis 15° (Nord). Die Ausbreitungsrichtungen entsprechen dabei den Windrichtungen um 180° versetzt. Die Radien im verwendeten Polarkoordinatensystem werden so gewählt, dass im Bereich der zu betrachtenden Aufpunkte (meist am Anlagenzaun) eine Entfernungsdiskretisierung von 10 m möglich ist. Die maximal betrachtete Entfernung beträgt 6.000 m.

### **2.3.1. Meteorologische Parameter**

Für den Standort werden konservativ keine charakteristischen meteorologischen Daten verwendet, daher sind gemäß [SSK 03] generisch folgende meteorologische Bedingungen (für eine Freisetzungsdauer zwischen 1 h und 8 h)<sup>2</sup> zugrunde zu legen:

- Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe 1 m/s,
- Wahl der Diffusionskategorie, die zur höchsten Gesamtexposition führt,
- Niederschlag 5 mm/h für Diffusionskategorien C, D und E, kein Niederschlag für die Diffusionskategorien A, B und F sowie
- Wahl der Ausbreitungsrichtung (klassifiziert 12 Sektoren je 30°, Sektor 1 ist nach Nord ausgerichtet), die unter Berücksichtigung der Entfernung des Anlagenzauns und ggf. eines Gelände- und Gebäudeeinflusses zur höchsten Gesamtexposition führt.

Diese Vorgehensweise ist konservativ, da ungünstige meteorologische Bedingungen überlagert werden, die bei Berücksichtigung realer Wetterverhältnisse am Standort in dieser Kombination nicht auftreten würden.

### **2.3.2. Ablagerungsfaktoren**

Für die Berechnung der Dosis werden aus dem Ausbreitungsfaktor ein Faktor für die trockene Ablagerung (Falloutfaktor) und aus dem Washoutkoeffizienten ein Faktor für die nasse Ablagerung (Washoutfaktor) berechnet.

Den nuklidabhängigen Falloutfaktor erhält man durch Multiplikation des Ausbreitungsfaktors  $A_f$  mit der Ablagerungsgeschwindigkeit  $v_g$ :

$$F = A_f \cdot v_g \quad (\text{G 2-4})$$

Der nuklidabhängige Washoutfaktor berechnet sich im Gauß-Fahnenmodell gemäß [SSK 03] nach

$$W = \frac{\Lambda}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_y \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \quad (\text{G 2-5})$$

---

<sup>2</sup> In [SSK 03] werden verschiedene Zeitintervalle für Freisetzungsdauern unterschieden (0 bis 1 h, 1 bis 8 h, 8 bis 24 h, 24 bis 72 h, 72 bis 168 h).

wobei  $y$  die Entfernung zum Emissionspunkt ist,  $u$  die Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe und  $\sigma_y$  der Ausbreitungsparameter. Den zur Berechnung des nuklidabhängigen Washoutfaktors  $W$  benötigten Washoutkoeffizienten  $\Lambda$  für bestimmte Niederschlagsintensitäten  $I$  erhält man aus dem Washoutkoeffizienten  $\Lambda_0$  (für die Niederschlagsintensität  $I_0 = 1 \text{ mm/h}$ ) und der Niederschlagsintensität  $I$  in  $\text{mm/h}$  nach der Formel:

$$\Lambda = \Lambda_0 \cdot \left(\frac{I}{I_0}\right)^\kappa \quad (\text{G 2-6})$$

wobei für  $\kappa$  die Werte 1,0 für Tritium und 0,8 für Aerosole und Iod anzusetzen sind.

Parameter zur Berechnung der nassen und trockenen Ablagerungsraten für Aerosole mit einem aerodynamischen Durchmesser von maximal  $10 \mu\text{m}$  werden gemäß [SSK 03], Anhang 4 (Ablagerungsgeschwindigkeit  $v_g = 0,0015 \text{ m/s}$ , Washoutkoeffizient  $\Lambda_0 = 7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  für die Niederschlagsintensität  $I_0$ ) verwendet.

Für eine konservative Ermittlung der nassen und trockenen Ablagerungsraten für Aerosole mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $> 10 \mu\text{m}$  wird auf die Festlegungen der TA-Luft [BMU 02] und die Vorschläge für ein atmosphärisches Radionuklidtransportmodell (ARTM) auf Basis des Lagrangeschen Partikelansatzes [BMU 07] zurückgegriffen (Ablagerungsgeschwindigkeit  $v_g = 0,05 \text{ m/s}$ , Washoutkoeffizient  $\Lambda_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  für die Niederschlagsintensität  $I_0$ ).

Die Fahnenabreicherung durch Fallout und Washout ist für die im vorliegenden Bericht betrachteten Entfernungen der Aufpunkte von den Emissionsorten gering und wird daher bei den Ausbreitungsberechnungen konservativ nicht berücksichtigt.

### **2.3.3. Gelände- und Gebäudeeinfluss**

Im Gauß-Fahnenmodell können Gelände- und Gebäudeeinflüsse auf die Ausbreitung durch die Modifikation der effektiven Freisetzungshöhe und der abstandsabhängigen Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  erfolgen. Details dazu sind in [SSK 03], Anhang 7 aufgeführt.

Im vorliegenden Bericht erfolgt die Berücksichtigung des Gelände- und Gebäudeeinflusses auf Grund besonderer Standortgegebenheiten in einem integrierten Ansatz. Hierauf wird im Kapitel 3 näher eingegangen.

Ein Gebäudeeinfluss ist dann zu berücksichtigen, wenn die Emissionshöhe  $H$  kleiner als die Summe aus Gebäudehöhe  $H_G$  und dem Parameter  $I_G$  (siehe unten) ist. Ein Einfluss auf alle Sektoren ergibt sich dann, wenn sich die horizontale Quellposition direkt auf dem Gebäudedach oder im Abstand von kleiner  $I_G/4$  vom Gebäude befindet.  $I_G$  ist dabei der kleinere Wert der Gebäudebreite in Anströmrichtung und der Gebäudehöhe.

Der Gebäudeeinfluss wird dadurch berücksichtigt, dass die Emissionshöhe  $H$  durch

$$h' = 0,5 \cdot [3 \cdot H - (H_G + I_G)] \quad \text{für } H_G \leq H \leq 2 \cdot H_G \quad (\text{G 2-7})$$

hin zu einer kleineren effektiven Emissionshöhe  $h'$  korrigiert wird.

Eine Reduzierung der Emissionshöhe führt bei sonst gleichen Parametern in den Ausbreitungsrechnungen unter den gegebenen Bedingungen zur Erhöhung der bodennahen Konzentration und damit auch zur Erhöhung des Falloutfaktors. Der Washoutfaktor wird durch die Berücksichtigung von

Gebäuden nicht direkt<sup>3</sup> beeinflusst, da bei dessen Berechnung eine vertikale Summierung über die komplette Ausbreitungsschicht auftritt, so dass vertikale Vermischungen keinen Einfluss haben.

Ist die berechnete effektive Emissionshöhe kleiner als die Gebäudehöhe, so sind entsprechend [SSK 03], Anhang 7 zusätzlich die Ausbreitungsparameter  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  gemäß

$$\sigma'_y = \sqrt{\sigma_y^2 + \frac{I_G^2}{\pi}}, \quad \sigma'_z = \sqrt{\sigma_z^2 + \frac{I_G^2}{\pi}} \quad (\text{G 2-8})$$

zu korrigieren.

Dadurch wird eine höhere Vermischung der Abluftfahne durch den Gebäudeeinfluss in kurzen Abständen zum Emissionsort berücksichtigt. Bei bodennaher Freisetzung führt dies zu einer geringeren bodennahen Konzentration an möglichen Aufpunkten. Bei großen Freisetzungshöhen wird die bodennahe Konzentration an möglichen Aufpunkten dagegen erhöht.

#### **2.3.4. Quellüberhöhung**

Für den Fall eines Containerbrandes wird konservativ von einer bodennahen Freisetzung ohne weitere thermische oder mechanische Überhöhung ausgegangen. Damit sind die Betrachtungen abdeckend für einen Containerbrand, der unter einer Überdachung auftritt und für den somit keine relevante Überhöhung berücksichtigt werden kann.

### **2.4. Dosisberechnung**

In den folgenden Abschnitten werden die in dieser Untersuchung berücksichtigten Expositionspfade (Abschnitt 2.4.1) und die angenommenen Lebensgewohnheiten (Abschnitt 2.4.2), wie sie in [SSK 03] festgelegt sind, soweit sie für die weitere Berechnung von Belang sind, wiedergegeben. Weiterhin werden die zu berücksichtigenden Dosiskoeffizienten (Abschnitt 2.4.3) erläutert.

Zur Berechnung der Exposition werden Referenzpersonen aus sechs Altersgruppen gemäß Anlage 11 Teil B der StrlSchV betrachtet:

- Säuglinge ( $\leq 1$  Jahr),
- Kleinkinder ( $> 1 - \leq 2$  Jahre),
- Kindergartenkinder ( $> 2 - \leq 7$  Jahre),
- Schulkinder ( $> 7 - \leq 12$  Jahre),
- Jugendliche ( $> 12 - \leq 17$  Jahre) und
- Erwachsene ( $> 17$  Jahre).

---

<sup>3</sup> Eine indirekte Beeinflussung ist dann gegeben, wenn die tatsächliche Emissionshöhe größer als 50 m und die korrigierte Emissionshöhe kleiner als 180 m ist. Hier werden für die korrigierte Emissionshöhe gemäß [SSK 03], Anhang 3 veränderte Ausbreitungskoeffizienten und Exponenten berechnet.

### **2.4.1. Expositionspfade**

Als Expositionspfade für Störfälle werden alle Pfade berücksichtigt, die für Ableitungen über den Luftpfad in Frage kommen. Dies sind nach [SSK 03] die Pfade:

- äußere Strahlenexposition durch  $\beta$ -Strahlung innerhalb der Abluftfahne ( $\beta$ -Submersion),
- äußere Strahlenexposition durch  $\gamma$ -Strahlung aus der Abluftfahne ( $\gamma$ -Submersion),
- äußere Strahlenexposition durch  $\gamma$ -Strahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe ( $\gamma$ -Bodenstrahlung),
- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation) und
- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe als Folge ihrer Ablagerung auf Pflanzenteilen und dem Boden mit der Nahrung (Ingestion).

Für den Expositionspfad Ingestion werden die Teilpfade

- Luft – Pflanze,
- Luft – Futterpflanze – Kuh – Milch,
- Luft – Futterpflanze – Tier – Fleisch,
- Luft – Muttermilch und
- Luft – Nahrung – Muttermilch

betrachtet. Dabei werden sowohl direkte Ablagerungen auf Pflanzenteilen als auch der Transfer von Radionukliden aus dem Boden berücksichtigt.

### **2.4.2. Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen**

Es werden die gemäß Anlage 11 StrlSchV zu berücksichtigenden Altersklassen betrachtet.

#### **2.4.2.1. Lebensmittelverzehr zur Berücksichtigung bei Auslegungstörfällen**

Zur Berechnung der Exposition durch Ingestion wird angenommen, dass die Referenzpersonen pflanzliche Lebensmittel, die am ungünstigsten Aufpunkt angebaut wurden und tierische Lebensmittel, deren Futter vom ungünstigsten Aufpunkt stammt, verzehren.

Für das Jahr, in dem die potentielle Freisetzung stattfindet, wird davon ausgegangen, dass Radionuklide in die Nahrungs- und Futterpflanzen durch Ablagerungen auf der Blattoberfläche gelangen. Für die Folgejahre wird von einer Aufnahme aus dem kontaminierten Boden ausgegangen. Die Aufnahme von Radionukliden der Referenzpersonen durch Ingestion wird über eine Dauer betrachtet, die am Zeitpunkt des Freisetzungsbegins startet und mit Ablauf des 70. Lebensjahrs der Referenzperson endet.

Gemäß [SSK 03], Abschnitt 4.3.2 wird unterstellt, dass der Verzehr von Lebensmitteln und der Verbrauch von Futtermitteln, die zum Störfallzeitpunkt in einer Entfernung von weniger als 2.000 m um den Emissionsort angebaut worden waren, 24 h nach Störfallbeginn eingestellt wird. In den Folgejahren werden hingegen keine Einschränkungen hinsichtlich des Futter- und Nahrungsmittelanbaus wirksam.

In [SSK 03], Anhang 1, Tabelle 2 sind gemäß Anlage VII Teil B Tabelle 1 StrlSchV<sup>2001</sup> (jetzt Anlage 11 Teil B Tab. 1 StrlSchV) die den Dosisberechnungen zugrunde zu legenden Verzehrmenngen für die verschiedenen Lebensmittelarten der sechs Altersgruppen angegeben. In diesem Anhang



heißt es: „Zur Berücksichtigung der 95 % Perzentile der jährlichen Verzehrsmengen der Referenzpersonen sind die mittleren jährlichen Verzehrsmengen mit den Faktoren der Spalte 8 zu multiplizieren“. Diese Faktoren sind gemäß [BMU 00] so gewählt, „dass bei einer Multiplikation mit dem Mittelwert annähernd der 95-Perzentilwert der Verzehrrate der jeweiligen Nahrungsmittelgruppe abgedeckt wird“.

Die mit den Faktoren der Spalte 8 aus der o. g. Tabelle multiplizierten jährlichen Verzehrsmengen, die so für die nachfolgenden Dosisabschätzungen verwendet werden, sind in Tabelle 2-7 dargestellt.

Tabelle 2-7: Jahresverbrauch an Lebensmitteln der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Ingestion nach [SSK 03], Mengen in kg/a

Altersgruppe	≤ 1 a	> 1 - ≤ 2 a	> 2 - ≤ 7 a	> 7 - ≤ 12 a	> 12 - ≤ 17 a	> 17 a
Muttermilch	435					
Milch, Milchprodukte	135	480	480	510	510	390
Fleisch, Wurst, Eier	10	26	100	130	160	180
Getreide, Getreideprodukte	24	60	160	190	220	220
einheimisches Frischobst, Obstprodukte, Säfte	75	135	195	195	180	105
Kartoffeln, Wurzelgemüse, Säfte	90	120	135	165	165	165
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	15	51	90	105	105	120
Summe Pflanzen ohne Blattgemüse	204	366	580	655	670	610
Blattgemüse	9	18	21	27	33	39

#### 2.4.2.2. Atemraten

Gemäß [SSK 03], Anhang 1, Tabelle 3 sind nachfolgende altersgruppenabhängige Atemraten zur Berechnung der Inhalationsdosis zugrunde zu legen.

Tabelle 2-8: Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [SSK 03]

Altersgruppe	≤ 1 a	> 1 - ≤ 2 a	> 2 - ≤ 7 a	> 7 - ≤ 12 a	> 12 - ≤ 17 a	> 17 a
Atemrate [m <sup>3</sup> /s] Zeitintervall 0 bis 8 h	5,1·10 <sup>-5</sup>	8,7·10 <sup>-5</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	2,6·10 <sup>-4</sup>	3,3·10 <sup>-4</sup>	3,8·10 <sup>-4</sup>
Atemrate [m <sup>3</sup> /s] Zeitintervall > 8 h	3,5·10 <sup>-5</sup>	6,0·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	2,3·10 <sup>-4</sup>	2,6·10 <sup>-4</sup>

Im vorliegenden Bericht werden nur Freisetzungen betrachtet, die weniger als 8 h andauern. Für den Auslegungsstörfall sind daher gemäß [SSK 03] die Atemraten für das Zeitintervall 0 bis 8 h aus Tabelle 2-8 anzuwenden. Die Lungenretentionsklassen von Aerosolen werden so gewählt, dass sich der höchste Beitrag zur Inhalationsdosis ergibt.

### **2.4.2.3. Expositionszeiten bei Störfällen**

Bei der Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch äußere Bestrahlung und Inhalation wird angenommen, dass sich die exponierten Personen während des gesamten Durchzugs der Abluftfahne ungeschützt<sup>4</sup> im Freien aufhalten.

Die Exposition durch Bodenstrahlung wird über eine Dauer betrachtet, die am Zeitpunkt des Freisetzungsbegins startet und mit Ablauf des 70. Lebensjahrs der Referenzperson endet. Die Expositionszeit reicht demnach von 70 Jahren für die Altersgruppe der Säuglinge bis zu 53 Jahren für die Altersgruppe der Erwachsenen. Es wird unterstellt, dass die Referenzpersonen der Exposition durch Bodenstrahlung im gesamten betrachteten Zeitraum am ungünstigsten Aufpunkt ungeschützt ausgesetzt sind.

### **2.4.3. Dosiskoeffizienten**

Zur Berechnung der Strahlenexpositionen über die in Abschnitt 2.4.1 angegebenen Expositionspfade werden Dosiskoeffizienten für

- die Inhalation,
- die  $\gamma$ -Submersion,
- die  $\gamma$ -Bodenstrahlung und
- die  $\beta$ -Submersion

benötigt. Die StrlSchV verweist für die Dosiskoeffizienten auf [BMU 01]. Diese dort enthaltenen Dosiskoeffizienten werden für die Dosisberechnungen der vorliegenden Untersuchung angewendet.

## **2.5. Bewertungsmaßstab für Störfälle**

### **2.5.1. Planungswerte für die Dosis**

Gemäß § 194 StrlSchV gilt: *Bis zum Inkrafttreten allgemeiner Verwaltungsvorschriften zur Störfallvorsorge nach § 104 Absatz 6 ist bei Planung der in § 104 Absatz 3 und 4 genannten Anlagen und Einrichtungen die Störfallexposition so zu begrenzen, dass die durch Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung verursachte effektive Dosis von 50 Millisievert nicht überschritten wird.*

Da diese allgemeinen Verwaltungsvorschriften bislang nicht vorliegen, ist dieser Bewertungsmaßstab zu Grunde zu legen. Es werden dabei die gemäß Anlage 11 Teil B StrlSchV (bisher Anlage VII StrlSchV<sup>2001</sup>) zu berücksichtigenden Altersklassen betrachtet.

Im vorliegenden Bericht wird daher ein Planungswert von 50 mSv für die Effektivdosis als Bewertungsmaßstab herangezogen. Zusätzlich werden Organdosen gemäß § 104 Absatz 1 StrlSchV ermittelt (siehe Tabelle 2-9).

---

<sup>4</sup> Ungeschützt heißt in dem Zusammenhang, dass die Referenzperson der jeweiligen Exposition direkt ausgesetzt ist und keine Abschirmwirkung beim Aufenthalt in Gebäuden berücksichtigt wird.

Tabelle 2-9: Planungswerte für Effektivdosis und Organdosen § 104 Absatz 1 StrlSchV bei einem Störfall

Organ	Dosis [mSv]
effektiv	50
Schilddrüse	150
Haut, Hände, Unterarme, Füße, Knöchel	500
Augenlinse, Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50
Knochenoberfläche	300
Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre	150

### 2.5.2. Ungünstigste Aufpunkte

Hinsichtlich der ungünstigsten Einwirkungsstellen sind gemäß [SSK 03] „die Stellen zugrunde zu legen, an denen sich die höchste effektive Dosis oder die höchsten Organdosen ergeben. Dabei sind für die Summe der Dosen aus der externen Strahlenexposition durch die Abluftfahne (Betasubmersion und Gammasubmersion) und Inhalation sowie für die Dosis durch Bodenstrahlung jeweils die Stellen auszuwählen, an denen die Dosen am höchsten sind. Zusätzlich sind die Ingestionsdosen zu berücksichtigen, die sich (...) durch den Verzehr von Lebensmitteln ergeben. Dabei ist für die Erzeugung jeder Lebensmittelgruppe jeweils die Stelle auszuwählen, für die sich die höchsten Organdosen oder die höchste effektive Dosis durch den Verzehr dieser Lebensmittelgruppe ergeben“. Nach dieser Passage aus [SSK 03] ist hinsichtlich der Ingestionsdosen diejenige Stelle in der Umgebung der Anlage für einen Anbau von Lebensmitteln bzw. die Aufzucht von Vieh zu betrachten, die zu den am höchsten kontaminierten Nahrungsmitteln führt.

Damit sind grundsätzlich **drei ungünstigste Aufpunkte** zu betrachten:

1. die ungünstigste Einwirkungsstelle hinsichtlich  $\beta$ -Submersion,  $\gamma$ -Submersion und Inhalation (momentaner Aufenthalt während der Ableitung),
2. die ungünstigste Einwirkungsstelle hinsichtlich  $\gamma$ -Bodenstrahlung (dauerhafter Aufenthalts- punkt) und
3. die im Hinblick auf die Ingestionsdosis ungünstigste Stelle außerhalb des Anlagengeländes.

Im Einzelfall können zwei oder alle drei Orte identisch sein.

Die Lage der jeweils ungünstigsten Aufpunkte hängt von den (gemäß [SSK 03] anzunehmenden) meteorologischen Bedingungen, der Emissionshöhe, den Quellstärken für die einzelnen Nuklide, dem Verlauf des Zauns, und dem Gebäude- und Geländeeinfluss (da dieser sektorweise unterschiedlich zu berücksichtigen ist) ab. Dabei ist gemäß [SSK 03], Kapitel 4.4 „... die für das Gesamtergebnis ungünstigste Diffusionskategorie an den ungünstigsten Aufpunkten anzunehmen“.

### **3. STANDORTGEGEBENHEITEN**

#### **3.1. Lage und Gebäude**

Der Standort des Kernkraftwerks Krümmel befindet sich in unmittelbarer Elbnähe auf einer Geländehöhe von ca. 8,5 mNN. Nördlich des Standorts erfolgt bis in eine Entfernung von 500 m ein Geländeanstieg auf 40 mNN. Etwa 1,6 km nördlich werden bereits 70 mNN erreicht. Auch nordöstlich bzw. östlich des Standorts steigt das Terrain an und liegt nach 1,5 km bzw. 1 km auf etwa 60 mNN. Südöstlich bis westlich fließt die Elbe, deren südliches Ufer in einer Entfernung zwischen 500 m im Süden und ca. 1 km im Westen auf ca. 5 mNN liegt. Nordwestlich des Standortes ist wieder ein Geländeanstieg zu verzeichnen. Der etwa 500 m entfernte Kronsberg erreicht eine Höhe von ca. 60 mNN.



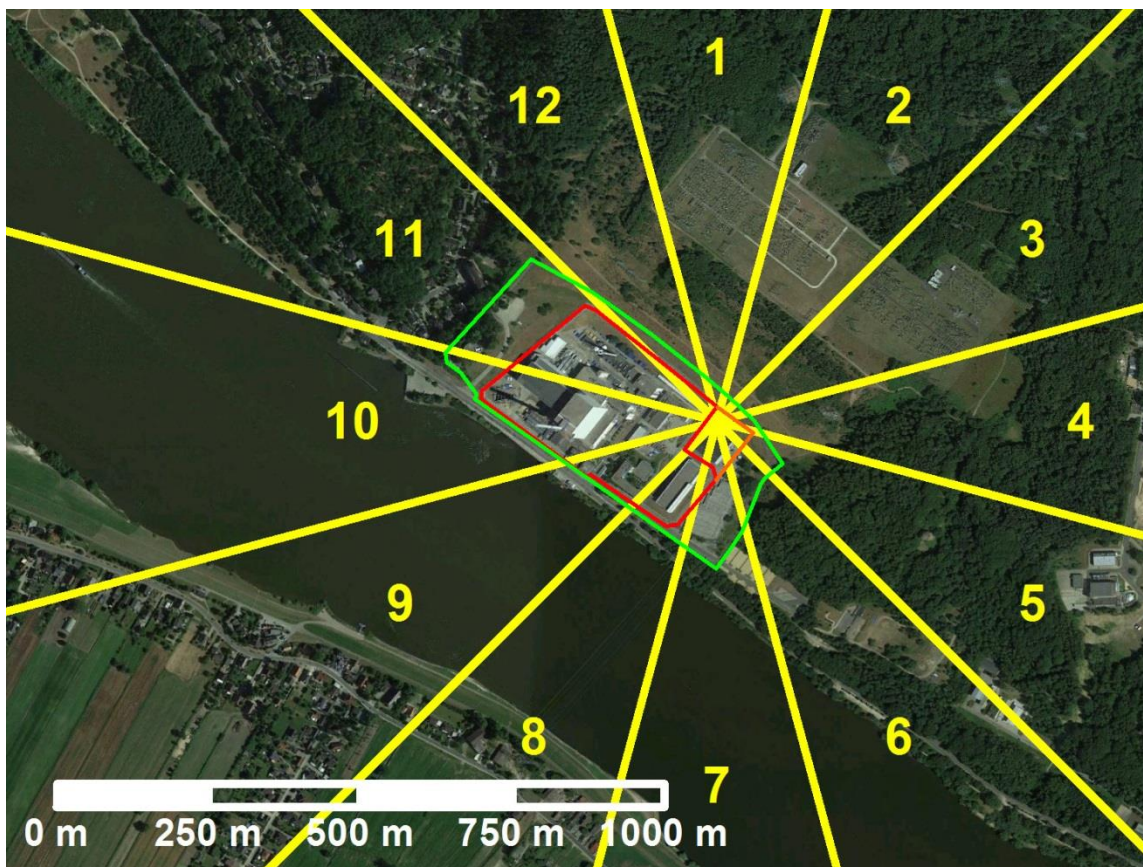
Abbildung 3-1: Kernkraftwerk Krümmel, Fotografie vom gegenüberliegenden Elbufer

Aus der Fotografie in Abbildung 3-1 ist die orographische Situation am Standort nach Norden hin deutlich erkennbar. Aus der Abbildung ist außerdem erkennbar, dass es sich beim Reaktorgebäude und beim Maschinenhaus um einen großen, geschlossenen Gebäudekomplex handelt. Es ist daher zu erwarten, dass sowohl die topographische Situation als auch die Gebäudeausmaße die Ausbrei-

tung beeinflussen und daher das Gauß-Fahnen-Modell nicht ohne weitere Prüfung verwendet werden kann.

Bei störfallbedingten bodennahen Freisetzungen ist allerdings zu erwarten, dass die ungünstigsten Einwirkstellen in unmittelbarer Nähe zur Quelle, d. h. also gerade außerhalb des Kraftwerkgeländes liegen. Es ist daher konservativ, wenn man für die bodennahen Freisetzungen eine Emissionshöhe von 0 m annimmt und eine quellnahe Verdünnung durch gebäudeinduzierte Turbulenz vernachlässigt.

Abbildung 3-2 zeigt ein Luftbild des KKK-Geländes mit Sektoreinteilung<sup>5</sup>. Die rote Linie entspricht dem geplanten Anlagenzaun (Grenze des Überwachungsbereichs). Die grüne Linie stellt die Grenze des Betriebsgeländes dar. Für Personen der allgemeinen Bevölkerung ist nur das Gelände außerhalb des Betriebsgeländes frei zugänglich. Dort ist im Allgemeinen mit einer Aufenthaltsdauer von 8.760 h im Kalenderjahr zu rechnen.



**Abbildung 3-2:** KKK-Gelände mit geplantem Anlagenzaun (rot), Betriebsgelände (grün) und Sektoreinteilung (erstellt auf Basis von Google Earth™ Pro Kartenservice Material)

<sup>5</sup> Die Festlegung des Koordinatenursprungs erfolgte im dargestellten Fall bezüglich der potentiellen Freisetzung aus dem LasmAaZ.

### **3.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigster Aufpunkt**

Es wird angenommen, dass die Störfälle „Absturz eines Containers“ und „Brand eines Containers“ im Bereich des LasmAaZ stattfinden. Bei störfallbedingten bodennahen Freisetzungen ist zu erwarten, dass die ungünstigsten Einwirkstellen in unmittelbarer Nähe zur Quelle, d. h. also gerade außerhalb des Kraftwerkgeländes liegen. Es ist daher konservativ, wenn man für die bodennahen Freisetzungen eine Emissionshöhe von 0 m annimmt und eine quellnahe Verdünnung durch gebäudeinduzierte Turbulenz oder den Geländeeinfluss vernachlässigt. Es wird der in Abbildung 3-2 eingezeichnete Ursprung des polaren Koordinatensystems verwendet, womit sich die in Tabelle 3-1 angegebenen Entfernungen zur Grenze des Anlagengeländes ergeben.

Tabelle 3-1: Entfernung der Begrenzung des Betriebsgeländes in den 12 Sektoren in m (auf 10 m gerundet)

<b>Sektor</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Richtung des Sektors in [°]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Entfernung zum Zaun	60	40	40	60	110	130	240	200	220	350	420	120

### **3.3. Nuklidvektoren**

Bei den verwendeten Nuklidvektoren erfolgt eine Unterscheidung zwischen Aktivierung und Kontamination, wobei jeweils typische und abdeckende Radionuklide in die Nuklidvektoren übernommen werden. Nuklidvektoren für die Ermittlung der potentiellen Expositionen bei Störfällen im LasmAaZ sind unabhängig von Nuklidvektoren, die zur Bewertung einer potentiellen Freigabe gemäß § 32 StrlSchV angewendet werden.

#### **3.3.1. Nuklidvektor Aktivierung**

In Form von Aktivierung vorliegende Nuklide führen bei den hier betrachteten Störfällen zu keiner relevanten Freisetzung. Daher wird der Nuklidvektor für Aktivierung nicht weiter betrachtet.

#### **3.3.2. Nuklidvektor Kontamination**

Der Nuklidvektor für Kontamination setzt sich zusammen aus Aktivierungsnukliden, die durch Korrosion ins System gelangen, aus Spaltprodukten und ggf. aus primären und sekundären Kernbrennstoffnukliden und weiteren Transuranen. Für die aus Aktivierungsnukliden resultierende Kontamination wird Co-60 als abdeckendes Nuklid verwendet. Bei den Spaltprodukten tritt Cs-137 als Hauptanteil auf. Zusätzlich wird im Folgenden Sr-90 berücksichtigt, für das ein typisches Verhältnis von  $A_{Sr-90}/A_{Cs-137} = 2,5/100$  angesetzt wird. Da für die Anlage KKK keine Erkenntnisse auf Vorliegen einer signifikanten  $\alpha$ -Kontamination vorliegen, wird bei Störfallbetrachtungen normalerweise abdeckend von einem Anteil der  $\alpha$ -Aktivität von 0,1 % im Mittel über alle Gebinde ausgegangen. Da im hier vorliegenden Störfall nur wenige Gebinde betroffen sind, wird konservativ ein Anteil von 1 % verwendet, um Gebinde mit ggf. erhöhter  $\alpha$ -Kontamination abzudecken. Stellvertretend für alle Kernbrennstoffe/Transurane ( $\alpha$ -Strahler) wird daher Am-241 mit einem konservativ hohen Gesamtanteil von 1 % berücksichtigt.

Für das Verhältnis zwischen Co-60 und Cs-137 wird auf den im 2. Teil des ESK-Stresstests [ESK 13] verwendeten Nuklidvektor für Zwischenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus Betrieb, Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zurückgegriffen. Hier wird ein Verhältnis von  $A_{Co-60}/A_{Cs-137} = 70/30$  angegeben.

Insgesamt ergibt sich somit der in Tabelle 3-2 angegebene normierte Nuklidvektor für Kontamination.

Tabelle 3-2: Nuklidvektoren für Kontamination

Nuklid	Nuklidvektor bei Kontamination
Co-60	68,79 %
Cs-137	29,48 %
Sr-90	0,73 %
Am-241	1,00 %

### 3.4. Aktivitätsinventar

Die im LasmAaZ insgesamt einzulagernde Aktivität soll gemäß [KKK 16]  $2 \cdot 10^{17}$  Bq betragen. Bei den Angaben zum Aktivitätsinventar für die nachfolgenden Störfallbetrachtungen werden die Nuklide H-3 und C-14 nicht weiter betrachtet, da diese als reine  $\beta$ -Strahler hauptsächlich über den Ingestionspfad relevant sind. Bei Störfällen tragen die beiden Nuklide aufgrund der relativ geringen Dosiskoeffizienten und der nicht kontinuierlichen Freisetzung im Vergleich zu anderen Nukliden nicht relevant zur Dosis bei und bei auslegungsüberschreitenden Störfällen wird der Ingestionspfad nicht weiter betrachtet.

Die zur Einlagerung ins LasmAaZ vorgesehenen Behältertypen sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt.

Tabelle 3-3: Zur Einlagerung im LasmAaZ vorgesehene Behältertypen nach [NIS 13]

Behältertyp	Anzahl	Abmessungen [m]			Mindestabstand [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
		Länge	Breite	Höhe		
Behälter Typ II	400	1,06	-	1,5	0,32	530
KC Typ II	50	1,7	1,6	1,7	0,13	231
KC Typ III	200	3,0	1,7	1,7	0,13	1.734
KC Typ IV	420	3,0	1,7	1,45	0,13	3.106
KC Typ V	130	3,2	2,0	1,7	0,13	1.414
Summe	1.200					7.015

Somit sind in Summe bis zu 400 Behälter Typ II und 800 Stahlblechcontainer vorhanden. Da für das LasmAaZ noch keine technischen Annahmebedingungen vorliegen, werden im Folgenden Werte für das in einzelnen Gebinden vorhandene Aktivitätsinventar aus den Annahmebedingungen für

das Endlager Konrad [BFS 14] abgeleitet. Dort ist festgelegt, dass zur Einlagerung in das Endlager Konrad das Summenkriterium

$$S_S(p, k) = F \cdot \sum_i \frac{A(i)}{G_S(i, p, k)} < 1 \quad (\text{G 3-1})$$

eingehalten werden muss. Dabei bezeichnen

$S_S(p, k)$       Summenwert für Abfallproduktgruppe  $p$  und Abfallbehälterklasse  $k$

$A(i)$           Aktivität des Radionuklids  $i$

$G_S(i, p, k)$       Aktivitätsgrenzwert des Radionuklids  $i$

$F$               Faktor (1 für einzelne Lagerung oder alleinige Handhabung auf einer Palette;  
2 für zwei Abfallgebinde auf einer Palette)

Bei Einlagerung von Gebinden mit einem Summenwert  $> 0,1$  ist die Zustimmung des BfS erforderlich. Die Annahme solcher Gebinde ist auf 1 % aller Abfallgebinde beschränkt, mit Ausnahme störfallfester Verpackungen der ABK I oder II.

In Tabelle 3-4 sind die resultierenden Werte für einen Summenwert = 1 zusammengestellt. Dabei wird nur der Nuklidvektor für Kontamination berücksichtigt, da es bei den hier betrachteten Störfällen zu keiner relevanten Freisetzung aus aktivierten Metallen kommt. Die Aktivitäten für einen Summenwert = 0,1 ergeben sich, indem die in den Tabellen angegebenen Maximalaktivitäten mit dem Faktor 0,1 multipliziert werden.



Tabelle 3-4: Störfallgrenzwerte nach Einlagerungsbedingungen Konrad [BFS 14] sowie resultierende Maximalaktivitäten für einen Summenwert = 1 bei Verwendung des Nuklidvektors für Kontamination

	ABK I APG 01	ABK I APG 02	ABK I APG 03	ABK I APG 04	ABK I APG 05	ABK I APG 06	ABK II APG 01 – 06	NV Kont.
<b>Störfallgrenzwerte [Bq]</b>								
Co-60	$5,00 \cdot 10^9$	$1,70 \cdot 10^{11}$	$6,10 \cdot 10^{11}$	$1,60 \cdot 10^{12}$	$5,00 \cdot 10^{12}$	$5,00 \cdot 10^{12}$	$1,20 \cdot 10^{14}$	68,79%
Ni-63	$7,00 \cdot 10^{11}$	$2,40 \cdot 10^{13}$	$8,70 \cdot 10^{13}$	$2,10 \cdot 10^{14}$	$7,00 \cdot 10^{14}$	$7,00 \cdot 10^{14}$	$1,70 \cdot 10^{16}$	0,00%
Fe-55	$1,40 \cdot 10^{13}$	$4,90 \cdot 10^{14}$	$1,70 \cdot 10^{15}$	$4,30 \cdot 10^{15}$	$1,40 \cdot 10^{16}$	$1,40 \cdot 10^{16}$	$3,40 \cdot 10^{17}$	0,00%
Cs-137	$5,10 \cdot 10^9$	$1,90 \cdot 10^{11}$	$6,40 \cdot 10^{11}$	$1,70 \cdot 10^{12}$	$5,10 \cdot 10^{12}$	$5,10 \cdot 10^{12}$	$1,30 \cdot 10^{14}$	29,48%
Sr-90	$8,60 \cdot 10^8$	$3,00 \cdot 10^{10}$	$1,10 \cdot 10^{11}$	$2,70 \cdot 10^{11}$	$8,60 \cdot 10^{11}$	$8,60 \cdot 10^{11}$	$2,10 \cdot 10^{13}$	0,73%
Am-241	$7,60 \cdot 10^8$	$3,70 \cdot 10^{10}$	$9,30 \cdot 10^{10}$	$2,30 \cdot 10^{11}$	$7,60 \cdot 10^{11}$	$7,60 \cdot 10^{11}$	$1,90 \cdot 10^{13}$	1,00%
<b>Maximale Gesamtaktivität [Bq] aus Summenkriterium = 1</b>								
$A_{\text{sum, grenz}}$	$4,61 \cdot 10^9$	$1,64 \cdot 10^{11}$	$5,67 \cdot 10^{11}$	$1,48 \cdot 10^{12}$	$4,61 \cdot 10^{12}$	$4,61 \cdot 10^{12}$	$1,13 \cdot 10^{14}$	100,00%
<b>Einzuhaltende nuklidspezifische Aktivitäten [Bq]</b>								
Co-60	$3,17 \cdot 10^9$	$1,13 \cdot 10^{11}$	$3,90 \cdot 10^{11}$	$1,02 \cdot 10^{12}$	$3,17 \cdot 10^{12}$	$3,17 \cdot 10^{12}$	$7,75 \cdot 10^{13}$	68,79%
Ni-63	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Fe-55	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Cs-137	$1,36 \cdot 10^9$	$4,82 \cdot 10^{10}$	$1,67 \cdot 10^{11}$	$4,37 \cdot 10^{11}$	$1,36 \cdot 10^{12}$	$1,36 \cdot 10^{12}$	$3,32 \cdot 10^{13}$	29,48%
Sr-90	$3,36 \cdot 10^7$	$1,19 \cdot 10^9$	$4,14 \cdot 10^9$	$1,08 \cdot 10^{10}$	$3,36 \cdot 10^{10}$	$3,36 \cdot 10^{10}$	$8,23 \cdot 10^{11}$	0,73%
Am-241	$4,61 \cdot 10^7$	$1,64 \cdot 10^9$	$5,67 \cdot 10^9$	$1,48 \cdot 10^{10}$	$4,61 \cdot 10^{10}$	$4,61 \cdot 10^{10}$	$1,13 \cdot 10^{12}$	1,00%

Da bei den unterstellten Szenarien jeweils nur eine kleine Anzahl von 1 bis 3 Gebinden betroffen ist und nach den Annahmebedingungen Konrad [BFS 14] maximal 1 % der im Endlager Konrad eingelagerten nicht störfallfesten Behälter einen Summenwert  $> 0,1$  besitzen darf, wird im weiteren konservativ davon ausgegangen, dass bei den betroffenen Gebinden der Summenwert = 1 ist. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3-5 aufgeführt. Zusätzlich zu den Endlager-Gebinden sind 20' Container aufgeführt, für die eine Aktivität von  $2 \cdot 10^9$  Bq verwendet wird.

Tabelle 3-5: Verwendetes maximales Nuklidinventar pro Gebinde. Konservativ wird von einem Störfallsummenwert = 1 ausgegangen.

ABK	APG	AGG	Maximales Aktivität pro Gebinde [Bq]				
			Co-60	Cs-137	Sr-90	Am-241	Summe
Nicht störfallfest	01	2	$3,2 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^9$
	02	2	$1,1 \cdot 10^{11}$	$4,8 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{11}$
	03	3	$3,9 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^{11}$
	04	4	$1,0 \cdot 10^{12}$	$4,4 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{12}$
	05	5	$3,2 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^{12}$
II	01 – 06	8	$7,8 \cdot 10^{13}$	$3,3 \cdot 10^{13}$	$8,2 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
20'-Container		1	$1,4 \cdot 10^9$	$5,9 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^9$

KC IV mit Verdampferkonzentraten (VKZ) können in KKK nicht in APG 06 eingeordnet werden, da diese die dafür notwendigen Kriterien erfüllen. Maximal ist eine Einordnung in APG 02 möglich, daher gelten die in Tabelle 3-5 angegebenen Maximalwerte für APG 02. In den weiteren Berechnungen wird daher APG 06 nicht weiter betrachtet.

### 3.5. Störfälle

#### 3.5.1. Absturz eines Gebindes

Für das LasmAaZ wird als ein möglicher Störfall der Absturz eines Gebindes (Containers) vom Kran unterstellt. Es ist vorgesehen, im Betriebsreglement die maximale Hubhöhe so festzulegen, dass für die Gebinde eine maximale Absturzhöhe von 5 m auftreten kann. Somit ist der Absturz nicht aus einer großen Höhe zu unterstellen und die Belastungsklasse BK 1 (bis ca. 5 m für den Abstand der Unterkante des Containers zum Boden) nach Tabelle 2-2 ist abdeckend für die möglichen Ereignisse. Da beim Absturz der Container auf einen Stapel weiterer Container auftreffen kann, wird berücksichtigt, dass der abstürzende Container auf zwei weitere Container fällt, die ebenfalls beschädigt werden. Dabei reduziert sich die effektive Fallhöhe um die Höhe der Oberkante der beiden Container<sup>6</sup>, die getroffen werden. Obwohl für Behälter der ABK II gemäß [BFS 14] die Einhaltung von Dichtigkeitskriterien bis zu einem Fall aus einer Höhe von 5 m gewährleistet sein muss, wird im Weiteren hiervon kein Kredit genommen und für alle Behälter abdeckend die Freisetzungsteile der Belastungsklasse BK 1 für die jeweilige Abfallgebindegruppe (AGG) verwendet. Die entsprechenden Zuordnungen sowie die resultierende potentielle Freisetzung und Exposition sind in Abschnitt 4.1 beschrieben.

<sup>6</sup> Bei den hier verwendeten Gebindetypen beträgt die Höhe eines einzelnen Containers zwischen 1,4 m (KC I und IV) und 1,7 m (KC II, III, V und VI), bei Stapelung liegt die Oberkante entsprechend höher.

### **3.5.2. Brand eines Gebindes**

Gemäß Brandschutzkonzept ist für den Lagerbereich nur von geringen Brandlasten auszugehen. Im Lagerbereich sollen hauptsächlich endlagergerecht konditionierte Abfälle gelagert werden. Weiterhin ist eine Pufferlagerung von 20'-Containern vorgesehen, in denen sich nur nicht vermeidbare Restmengen an brennbaren Stoffen befinden. Somit befinden sich im Lagerbereich keine nennenswerten Brandlasten, deren Brand zu einer thermischen Belastung von Gebinden und der damit potentiell verbundenen Freisetzung aus Gebinden führen könnte. Daher ist im Lagerbereich nicht mit einer brandbedingten Freisetzung zu rechnen.

Im Handhabungsbereich befindet sich während des An- bzw. Abtransports von Gebinden und 20'-Containern zusätzlich ein Transportfahrzeug. Da bei Verladevorgängen die Handhabung durch geschultes Personal überwacht wird, kann bei Bränden sofort reagiert werden. Somit ist nicht von einer großen Brandbelastung auszugehen und das Übergreifen eines potentiellen Brandes auf mehrere Gebinde kann ausgeschlossen werden.

Abdeckend wird unterstellt, dass im Handhabungsbereich der Brand eines Transportfahrzeuges auf einen 20'-Container übergreift, in dem sich geringe Mengen brennbarer Stoffe befinden.

Somit kann die abdeckend hoch angesetzte Gesamtaktivität für 20'-Container (30 min Branddauer), die mit nicht vermeidbaren Restmengen an brennbaren Stoffen befüllt sind, bei der weiteren Störfallbetrachtung zu Grunde gelegt werden. Die entsprechenden Freisetzungs- und Dosisberechnungen sind in Abschnitt 4.2 beschrieben. Dies gilt für alle Abfallgebilde einschließlich der Abfallgebilde mit APG 04 und APG 05 mit einem Summenwert  $\leq 0,1$ .

Für Abfallgebilde mit APG 04 und APG 05 mit einem Summenwert  $> 0,1$ , dies sind maximal 1 % der Konrad-gängigen Abfallgebilde, wird eine administrative Lösung im BHB festgelegt, die ein Übergreifen eines Brandes von der Zugmaschine auf Abfallgebilde mit APG 04 und APG 05 mit einem Summenwert  $> 0,1$  verhindert, z. B. durch Abkoppeln der Zugmaschine vor Einfahrt in den Handhabungsbereich.

## 4. DOSISBERECHNUNGEN

In Kapitel 4.1 wird die Dosisberechnung für den Absturz eines Gebindes beschrieben und in Kapitel 4.2 für den Brand eines Gebindes. Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen wurden entsprechend den Vorschriften in den Störfallberechnungsgrundlagen [SSK 03] durchgeführt. Dazu wurde die von der BS entwickelte Software BSSBG verwendet.

### 4.1. Absturz eines Gebindes

#### 4.1.1. Quelltermmittlung

##### 4.1.1.1. Betroffenes Inventar

Für den Absturz eines Gebindes wird davon ausgegangen, dass dieses Ereignis beim Heben des Gebindes auf einen Stapel mit Gebinden der gleichen Art eintritt. Daher wird angenommen, dass das abstürzende Gebinde zwei weitere Gebinde beschädigt. Somit sind von einem Containerabsturz potentiell drei Gebinde der gleichen Art betroffen, somit ist das Dreifache der in Tabelle 3-5 angegebenen Aktivität<sup>7</sup> betroffen. Tabelle 4-1 zeigt eine Aufstellung der potentiell betroffenen Aktivität für alle möglichen Gebindetypen.

Tabelle 4-1: Potentiell von einem Gebindeabsturz im LasmAaZ betroffene Aktivität. Dabei wird von 3 betroffenen Gebinden ausgegangen.

ABK	APG	AGG	Aktivität pro Gebinde [Bq]				
			Co-60	Cs-137	Sr-90	Am-241	Summe
Nicht störfallfest	01	2	$9,5 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{10}$
	02	2	$3,4 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$3,6 \cdot 10^9$	$4,9 \cdot 10^9$	$4,9 \cdot 10^{11}$
	03	3	$1,2 \cdot 10^{12}$	$5,0 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{12}$
	04	4	$3,1 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^{10}$	$4,4 \cdot 10^{10}$	$4,4 \cdot 10^{12}$
	05	5	$9,5 \cdot 10^{12}$	$4,1 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{13}$
II	01 – 06	8	$2,3 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{14}$
20'-Container		1	$4,1 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^9$

##### 4.1.1.2. Freigesetzte Aktivität

Mit Ausnahme für Aktivierungsprodukte (Nuklidvektor für Aktivierung bei APG 03) werden die Freisetzungsanteile aus den Behältern der Transportstudie Konrad [GRS 09] entnommen. Dabei wird die Zuordnung der Abfallgebindergruppen (AGG) zu den Abfallproduktgruppen (APG) nach Tabelle 2-1 verwendet. Gusscontainer werden AGG 8 zugeordnet. Bei mechanischer Belastung durch einen Gebindeabsturz wird davon ausgegangen, dass aus aktivierten Metallen nur anhaftende

<sup>7</sup> unter der konservativen Annahme, dass in allen drei Gebinden die maximal zulässige Aktivität der Annahmebedingungen ausgeschöpft wird

Kontamination freigesetzt wird (Freisetzungssanteile für AGG 3) und keine Aktivierung (Freisetzungssanteil 0).

Da über das Betriebsreglement eine maximale Absturzhöhe vorgeschrieben wird, die nicht wesentlich über der Behälterhöhe liegt, wird sowohl für den abstürzenden Behälter wie auch für die von diesem getroffenen Container Belastungsklasse BK 1 angesetzt, die Absturzhöhen bis ca. 5 m abdeckt (siehe Tabelle 2-2). Die daraus resultierenden Freisetzungssanteile sowie die Zuordnung zu den Abfallgebindegruppen ist in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Weiterhin wird für das LasmAaZ der Faktor *LPF* für die Gebäuderückhaltung nach (G 2-2) bzw. (G 2-3) berücksichtigt. Als Fläche, auf der sich die Aerosole innerhalb des Gebäudes absetzen können, wird dabei die Grundfläche des LasmAaZ berücksichtigt (ca. 51,2 m × 44,6 m). Aus der für das LasmAaZ vorgesehenen maximalen Lüftungsrate von bis zu 13.000 m<sup>3</sup>/h ergibt sich mit der angegebenen Grundfläche, einer Gebäudehöhe von 13,2 m (innen) und einem Anteil des freien Volumens von 90 % ein Luftwechsel von 0,48 h<sup>-1</sup>. Damit ergibt sich ein *LPF* von 0,51 für Partikel mit einem AED bis 10 µm (Absinkgeschwindigkeit  $v_d = 0,0015$  m/s nach [SSK 03]) und ein *LPF* von 0,031 für Partikel mit einem AED größer 10 µm (Absinkgeschwindigkeit  $v_d = 0,05$  m/s nach [BMU 07]). Diese *LPF*-Werte sind auf Ereignisse anzuwenden, die im Inneren des LasmAaZ bei geschlossenem Tor auftreten.

Um zu einer abdeckend konservativen Abschätzung der aus dem Gebäude freigesetzten Aktivität zu kommen, wird von einem deutlich höheren Luftwechsel ausgegangen (beispielsweise verursacht durch offen stehendes Tor). Bei einem Luftwechsel von 1 h<sup>-1</sup> ergibt sich somit ein *LPF*-Wert von 0,69 für Partikel mit einem AED bis 10 µm und ein *LPF*-Wert von 0,062 für Partikel mit einem AED größer 10 µm.

Die dabei resultierenden potentiell freigesetzten Aktivitäten sind für die unterschiedlichen Behälterklassen zusammen mit den Werten für *ARF* und *LPF* in Tabelle 4-2 aufgeführt. Bei der Berechnung der freigesetzten Aktivität wurde ein Skalierungsfaktor von 1,37 für das Behältervolumen berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.2.3).

Tabelle 4-2: Potentiell bei einem Gebindeabsturz im LasmAaZ freigesetzte Aktivität

	AED	ABK I					ABK II	20'
		APG 01	APG 02	APG 03	APG 04	APG 05	APG 01 – 06	
		AGG 2	AGG 2	AGG 3	AGG 4	AGG 5	AGG 8	
<b>Freisetzungsanteile (BK 1)</b>								
ARF <sup>1)</sup>	≤ 10 µm	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	3·10 <sup>-8</sup>	0	5·10 <sup>-6</sup>
	> 10 µm	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	2,7·10 <sup>-7</sup>	0	1·10 <sup>-5</sup>
<b>Faktor für Gebäuderückhaltung</b>								
LPF	≤ 10 µm	6,9·10 <sup>-1</sup>						
	> 10 µm	6,2·10 <sup>-2</sup>						
<b>potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]</b>								
ST (Co-60)	≤ 10 µm	4,5 · 10 <sup>4</sup>	<b>1,6 · 10<sup>6</sup></b>	5,5 · 10 <sup>4</sup>	1,4 · 10 <sup>5</sup>	2,7 · 10 <sup>5</sup>	0	2,0 · 10 <sup>4</sup>
ST (Cs-137)		1,9 · 10 <sup>4</sup>	<b>6,9 · 10<sup>5</sup></b>	2,4 · 10 <sup>4</sup>	6,2 · 10 <sup>4</sup>	1,2 · 10 <sup>5</sup>	0	8,4 · 10 <sup>3</sup>
ST (Sr-90)		4,8 · 10 <sup>2</sup>	<b>1,7 · 10<sup>4</sup></b>	5,9 · 10 <sup>2</sup>	1,5 · 10 <sup>3</sup>	2,9 · 10 <sup>3</sup>	0	2,1 · 10 <sup>2</sup>
ST (Am-241)		6,5 · 10 <sup>2</sup>	<b>2,3 · 10<sup>4</sup></b>	8,0 · 10 <sup>2</sup>	2,1 · 10 <sup>3</sup>	3,9 · 10 <sup>3</sup>	0	2,8 · 10 <sup>2</sup>
ST (Gesamt)		6,5 · 10 <sup>4</sup>	<b>2,3 · 10<sup>6</sup></b>	8,0 · 10 <sup>4</sup>	2,1 · 10 <sup>5</sup>	3,9 · 10 <sup>5</sup>	0	2,8 · 10 <sup>4</sup>
ST (Co-60)	> 10 µm	8,1 · 10 <sup>3</sup>	<b>2,9 · 10<sup>5</sup></b>	9,9 · 10 <sup>3</sup>	2,6 · 10 <sup>4</sup>	2,2 · 10 <sup>5</sup>	0	3,5 · 10 <sup>3</sup>
ST (Cs-137)		3,5 · 10 <sup>3</sup>	<b>1,2 · 10<sup>5</sup></b>	4,3 · 10 <sup>3</sup>	1,1 · 10 <sup>4</sup>	9,4 · 10 <sup>4</sup>	0	1,5 · 10 <sup>3</sup>
ST (Sr-90)		8,6 · 10 <sup>1</sup>	<b>3,1 · 10<sup>3</sup></b>	1,1 · 10 <sup>2</sup>	2,8 · 10 <sup>2</sup>	2,3 · 10 <sup>3</sup>	0	3,7 · 10 <sup>1</sup>
ST (Am-241)		1,2 · 10 <sup>2</sup>	<b>4,2 · 10<sup>3</sup></b>	1,4 · 10 <sup>2</sup>	3,8 · 10 <sup>2</sup>	3,2 · 10 <sup>3</sup>	0	5,1 · 10 <sup>1</sup>
ST (Gesamt)		1,2 · 10 <sup>4</sup>	<b>4,2 · 10<sup>5</sup></b>	1,4 · 10 <sup>4</sup>	3,8 · 10 <sup>4</sup>	3,2 · 10 <sup>5</sup>	0	5,1 · 10 <sup>3</sup>

<sup>1)</sup> luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)

Die größten potentiell freigesetzten Aktivitäten ergeben sich für APG 02. Diese werden bei den im Folgenden beschriebenen Ausbreitungs- und Dosisberechnungen als abdeckende Werte für die potentielle Freisetzung bei einem Containerabsturz verwendet.<sup>8</sup>

#### 4.1.2. Ausbreitungsberechnung

Der Emissionsort wird auf das LasmAaZ gelegt. Die Freisetzungen werden als impuls- und wärme-lose Quellen betrachtet. Als Freisetzungsdauer wird nach [SSK 03] der Zeitraum bis 8 h angenommen. Es wird von einer bodennahen Freisetzung ohne thermische Überhöhung ausgegangen. Es wird kein Gebäudeeinfluss für die Ausbreitung berücksichtigt.

Für die Freisetzung wurde die ungünstigste Ausbreitungssituation und die Lage der ungünstigsten Aufpunkte unter Beachtung der in Abschnitt 2.2.3 aufgeführten meteorologischen Randbedingun-

<sup>8</sup> Der Absturz eines Gebindes auf Gebinde eines anderen Typs führt immer zu geringeren potentiell freigesetzten Aktivitäten als der Absturz eines Gebindes mit höchstem Freisetzungspotential auf Gebinde des gleichen Typs.

gen außerhalb des Überwachungsbereichs ermittelt. Die sektorweisen Entfernungen des Zauns vom Emissionsort wurden aus Tabelle 3-1 entnommen.

Für den Störfall sind nur die Expositionspfade Ingestion und  $\gamma$ -Bodenstrahlung radiologisch relevant. Es werden die Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter für die folgenden Expositionspfade angegeben:

- $\gamma$ -Bodenstrahlung: Ablagerungsfaktor auf dem Boden, berechnet als Summe des Falloutfaktors und des Washoutfaktors,
- Inhalation: Ausbreitungsfaktor und
- Ingestion: Ablagerungsfaktor auf Pflanzen, berechnet als Summe des Falloutfaktors und des Washoutfaktors multipliziert mit 0,3, sowie Ablagerungsfaktor auf dem Boden, berechnet als Summe des Falloutfaktor und des Washoutfaktors und Ablagerungsfaktor auf dem Boden

In Tabelle 4-3 sind die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen und Aufpunkte und die dortigen, dosisrelevanten Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter (der Ablagerungsfaktor auf dem Boden ist beim Expositionspfad Ingestion nicht angegeben, wenn beim Expositionspfad  $\gamma$ -Bodenstrahlung derselbe ungünstige Aufpunkt ermittelt wurde) angegeben. Die Angaben zu Sektor und Entfernung beziehen sich dabei jeweils auf den Emissionspunkt als Nullpunkt des Polarkoordinatensystems.

**Tabelle 4-3:** Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung beim Absturz eines Containers im LasmAaZ

AED <sup>e)</sup>	AK <sup>f)</sup>	$\gamma$ -Bodenstrahlung		Inhalation		Ingestion	
		AP <sup>a)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>b)</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>b)</sup>	AP <sup>a)</sup>	A <sub>f</sub> [s/m <sup>3</sup> ] <sup>c)</sup>	AP <sup>a)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>Pf</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>d)</sup>
0 – 10 $\mu$ m	F	2/40	9,5·10 <sup>-6</sup>	2/40	6,3·10 <sup>-3</sup>	2/40	9,5·10 <sup>-6</sup>
10 – 100 $\mu$ m			3,2·10 <sup>-4</sup>		-		3,2·10 <sup>-4</sup>

- a) AP: Aufpunkt, Sektor/Entfernung [m]
- b) W<sub>f</sub><sup>b)</sup>: Ablagerungsfaktor für den Boden [1/m<sup>2</sup>]
- c) A<sub>f</sub>: Ausbreitungsfaktor [s/m<sup>3</sup>]
- d) W<sub>f</sub><sup>Pf</sup>: Ablagerungsfaktor für Pflanzen [1/m<sup>2</sup>]
- e) AED: aerodynamisch äquivalenter Partikeldurchmesser
- f) AK: Diffusionskategorie

Die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen ergeben sich für die betrachtete Freisetzung mit Diffusionskategorie F (kein Niederschlag). Der Aufpunkt liegt in Sektor 2 bei einer Entfernung von 40 m direkt am Massivzaun in nördlicher Richtung vom LasmAaZ.

### 4.1.3. Ergebnisse der Dosisberechnung

Aus den in Abschnitt 4.1.1 berechneten Freisetzungsaktivitäten und den in Abschnitt 4.1.2 berechneten Ausbreitungs- und Ablagerungsparametern wurde die Effektivdosis für die 6 Altersgruppen berechnet. Diese Berechnungen erfolgten jeweils separat für die freigesetzten Nuklide.

Es wurden alle gemäß Abschnitt 2.4.1 zu betrachtenden Expositionspfade in die Berechnung mit einbezogen. Die Ergebnisse der Berechnung zur effektiven Dosis sind in Tabelle 4-4 nuklidspezifisch angegeben.

Tabelle 4-4: Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung beim Absturz eines Containers im LasmAaZ

AED	Nuklid	Effektive Dosis [mSv]					
		≤ 1 a	> 1 – ≤ 2 a	> 2 – ≤ 7 a	> 7 – ≤ 12 a	> 12 – ≤ 17 a	> 17 a
0 – 10 µm	Co-60	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
	Cs-137	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
	Sr-90	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
	Am-241	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$
	Summe	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
10 – 100 µm	Co-60	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
	Cs-137	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
	Sr-90	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$
	Am-241	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	Summe	0,13	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$
Summe	Co-60	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
	Cs-137	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
	Sr-90	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	Am-241	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
	<b>Summe</b>	0,15	0,11	0,12	0,11	0,11	$9,4 \cdot 10^{-2}$

Für alle Altersklassen wird die potentielle Exposition hauptsächlich durch Co-60, Cs-137 und Am-241 verursacht. Etwa 86 % der potentiellen Exposition entsteht dabei durch Partikel mit einem AED größer 10 µm. Die höchste Exposition ergibt sich für die Altersklasse bis 1 Jahr mit 0,15 mSv. Für diese Altersklasse beläuft sich der Anteil der γ-Bodenstrahlung an der potentiellen Exposition auf ca. 37 %. Ingestion trägt zu ca. 62 % bei. Der Anteil von Inhalation und β-/γ-Submersion beträgt weniger als 1 %. Für die Altersklasse der Erwachsenen (> 17 Jahre) belaufen sich die Anteile auf etwa 46 % für γ-Bodenstrahlung, 48 % für Ingestion und 6 % für Inhalation und β-/γ-Submersion.

Die Ergebnisse für die potentiellen Organdosen der am höchsten belasteten Altersklasse bis 1 Jahr sind in Tabelle 4-5 angegeben.



Tabelle 4-5: Potentielle Organdosis am ungünstigsten Aufpunkt beim Absturz eines Containers im LasmAaZ für die am höchsten belastete Altersklasse bis 1 Jahr

Organ	Potentielle Dosis [mSv]							Ausschöpfung.
	$\gamma$ -Boden	$\gamma$ -Subm.	$\beta$ -Subm.	Inhalation	Subm. und Inhalation	Ingestion	Summe	
ET Luftwege	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,09%
Lunge	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	0	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Blase	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Brust	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-8}$	0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,07%
Gehirn	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$	0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Haut	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,02%
Hoden	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$	0	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,25%
Knochenoberfläche	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	0	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	0,71	0,81	0,27%
Leber	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$	0	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,22	0,15%
Speiseröhre	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,07%
Magen	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Dünndarm	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,08%
Oberer Dickdarm	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,10%
Unterer Dickdarm	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$	0	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0,13	0,18	0,12%
Dickdarm	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,11	0,16	0,11%
Milz	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$	0	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Muskel	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$	0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,08%
Nebennieren	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-8}$	0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Nieren	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$	0	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,09%
Ovarien	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$	0	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,28%
Pankreas	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	0	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Rotes Knochenmark	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$	0	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	0,17	0,24	0,47%
Schilddrüse	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,09%
Thymus	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$	0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,08%
Uterus	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,24%
Effektive Dosis	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,30%

Die höchste Ausschöpfung des Planungswertes gemäß § 194 StrlSchV ergibt sich für die potentielle Organdosis des Roten Knochenmarks (Planungswert 50 mSv) mit 0,47 %. Somit werden die Planungswerte für das Ereignis eines Containerabsturzes im LasmAaZ deutlich unterschritten.

## **4.2. Brand eines Gebindes**

### **4.2.1. Quelltermittlung**

#### **4.2.1.1. Betroffenes Inventar**

Bei den im LasmAaZ einzulagernden Behältern handelt es sich um geschlossene Gebinde mit einer nicht brennbaren Außenumschließung. Im LasmAaZ existieren keine Brandlasten und Zündquellen in dem Umfang, die einen Brand in solchen Gebinden verursachen können. Allerdings können in 20'-Containern geringe Mengen an Brandlasten vorliegen. Weiterhin ist eine mögliche Brandlast durch den Kraftstoff bei Einfahrt motorgetriebener Transportfahrzeuge in den Handhabungsbereich gegeben.

Als abdeckendes Ereignis wird daher der Brand eines Transportfahrzeugs im Handhabungsbereich des LasmAaZ betrachtet, durch den ein Gebinde (20'-Container mit einer geringen Menge an brennbaren Reststoffen) 30 Minuten lang der thermischen Belastung durch den Brand ausgesetzt ist. Da von einem betroffenen Gebinde ausgegangen wird, entspricht die betroffene Aktivität der maximalen Aktivität in einem 20'-Container, welche in Tabelle 3-5 aufgeführt ist.

#### **4.2.1.2. Freigesetzte Aktivität**

Es werden konservativ die Freisetzungsanteile *ARF* für Gebinde der AGG 1 mit brennbaren unfraktionierten Abfällen aus der Transportstudie Konrad [GRS 17] verwendet, da im betrachteten 20'-Container eine geringe Brandlast vorhanden sein kann.

Um auch einen Brand außerhalb des Handhabungsbereichs des LasmAaZ zu berücksichtigen, werden die Reduktionsfaktoren der Gebäuderückhaltung auf *LPF* = 1 gesetzt.

Die resultierenden potentiell freigesetzten Aktivitäten sind zusammen mit den Werten für *ARF* und *LPF* in Tabelle 4-6 aufgeführt.

Tabelle 4-6: Potentiell bei einem Brand freigesetzte Aktivität

	AED	20'-Container
		Kontamination
		AGG 1
<b>Freisetzungsanteile (BK 3)</b>		
ARF <sup>a)</sup>	≤ 10 µm	Cs-137: 1,0·10 <sup>-1</sup> , sonstige Nuklide 1,0·10 <sup>-2</sup> b)
	> 10 µm	1,0·10 <sup>-5</sup>
<b>Faktor für Gebäuderückhaltung</b>		
LPF	≤ 10 µm	1
	> 10 µm	1
<b>potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]</b>		
ST (Co-60)	≤ 10 µm	1,4·10 <sup>7</sup>
ST (Cs-137)		6,0·10 <sup>7</sup>
ST (Sr-90)		1,5·10 <sup>5</sup>
ST (Am-241)		2,0·10 <sup>5</sup>
ST (Gesamt)		7,4·10 <sup>7</sup>
ST (Co-60)	> 10 µm	1,4·10 <sup>4</sup>
ST (Cs-137)		6,0·10 <sup>3</sup>
ST (Sr-90)		1,5·10 <sup>2</sup>
ST (Am-241)		2,0·10 <sup>2</sup>
ST (Gesamt)		2,0·10 <sup>4</sup>

a) luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)

b) Korrektur für sonstige Nuklide bei einem AED ≤ 10 µm wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben

#### 4.2.2. Ausbreitungsberechnung

Der Emissionsort wird auf das LasmAaZ gelegt. Die Freisetzungen werden als impuls- und wärme-lose Quellen betrachtet. Als Freisetzungsdauer wird nach [SSK 03] der Zeitraum bis 8 h angenommen. Es wird von einer bodennahen Freisetzung ohne thermische Überhöhung ausgegangen. Es wird kein Gebäudeeinfluss des LasmAaZ auf die Ausbreitung berücksichtigt.

Für die Freisetzung wurde die ungünstigste Ausbreitungssituation und die Lage der ungünstigsten Aufpunkte unter Beachtung der in Abschnitt 2.2.3 aufgeführten meteorologischen Randbedingungen außerhalb des Überwachungsbereichs ermittelt. Die sektorweisen Entfernungen des Zauns vom Emissionsort wurden aus Tabelle 3-1 entnommen.

Für den Störfall sind nur die Expositionspfade Ingestion und γ-Bodenstrahlung radiologisch relevant. Es werden die Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter für die folgenden Expositionspfade angegeben:

γ-Bodenstrahlung: Ablagerungsfaktor auf dem Boden, berechnet als Summe des Falloutfaktors und des Washoutfaktors,

Inhalation: Ausbreitungsfaktor und

**Ingestion:** Ablagerungsfaktor auf Pflanzen, berechnet als Summe des Falloutfaktors und des Washoutfaktors multipliziert mit 0,3, sowie Ablagerungsfaktor auf dem Boden, berechnet als Summe des Falloutfaktor und des Washoutfaktors und Ablagerungsfaktor auf dem Boden

In Tabelle 4-7 sind die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen und Aufpunkte und die dortigen, dosisrelevanten Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter (der Ablagerungsfaktor auf dem Boden ist beim Expositionspfad Ingestion nicht angegeben, wenn beim Expositionspfad  $\gamma$ -Bodenstrahlung derselbe ungünstige Aufpunkt ermittelt wurde) angegeben. Die Angaben zu Sektor und Entfernung beziehen sich dabei jeweils auf den Emissionspunkt als Nullpunkt des Polarkoordinatensystems.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung beim Brand eines Gebindes im LasmAaZ

AED <sup>e)</sup>	DK <sup>f)</sup>	$\gamma$ -Bodenstrahlung		Inhalation		Ingestion	
		AP <sup>a)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>b)</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>b)</sup>	AP <sup>a)</sup>	A <sub>f</sub> [s/m <sup>3</sup> ] <sup>c)</sup>	AP <sup>a)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>Pf</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>d)</sup>
0 – 10 $\mu$ m	E	2/40	1,6·10 <sup>-5</sup>	2/40	5,4·10 <sup>-3</sup>	2/40	1,6·10 <sup>-5</sup>
10 – 100 $\mu$ m			3,0·10 <sup>-4</sup>		-		3,0·10 <sup>-4</sup>

- a) AP: Aufpunkt, Sektor/Entfernung [m]
- b) W<sub>f</sub><sup>b)</sup>: Ablagerungsfaktor für den Boden [1/m<sup>2</sup>]
- c) A<sub>f</sub>: Ausbreitungsfaktor [s/m<sup>3</sup>]
- d) W<sub>f</sub><sup>Pf</sup>: Ablagerungsfaktor für Pflanzen [1/m<sup>2</sup>]
- e) AED: aerodynamisch äquivalenter Partikeldurchmesser
- f) DK: Diffusionskategorie

Die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen ergeben sich für die betrachtete Freisetzung mit Diffusionskategorie E mit 5 mm/h Niederschlag. Der Aufpunkt liegt in Sektor 2 bei einer Entfernung von 40 m direkt am Massivzaun in nördlicher Richtung vom LasmAaZ.

### 4.2.3. Ergebnisse der Dosisberechnung

Aus den in Abschnitt 4.2.1 berechneten Freisetzungsaktivitäten und den in Abschnitt 4.2.2 berechneten Ausbreitungs- und Ablagerungsparametern wurde die Effektivdosis für die 6 Altersgruppen berechnet. Diese Berechnungen erfolgten jeweils separat für die freigesetzten Nuklide.

Es wurden alle gemäß Abschnitt 2.4.1 zu betrachtenden Expositionspfade in die Berechnung mit einbezogen. Die Ergebnisse der Berechnung zur effektiven Dosis sind in Tabelle 4-8 nuklidspezifisch angegeben.

Tabelle 4-8: Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung beim Brand eines Gebindes im LasmAaZ

AED	Nuklid	Effektive Dosis [mSv]					
		≤ 1 a	> 1 – ≤ 2 a	> 2 – ≤ 7 a	> 7 – ≤ 12 a	> 12 – ≤ 17 a	> 17 a
0 – 10 µm	Co-60	0,14	0,12	0,12	0,11	9,6·10 <sup>-2</sup>	7,6·10 <sup>-2</sup>
	Cs-137	0,72	0,60	0,64	0,64	0,76	0,72
	Sr-90	4,8·10 <sup>-3</sup>	3,5·10 <sup>-3</sup>	3,4·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-3</sup>	4,4·10 <sup>-3</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>
	Am-241	4,8·10 <sup>-2</sup>	2,4·10 <sup>-2</sup>	2,7·10 <sup>-2</sup>	3,5·10 <sup>-2</sup>	4,0·10 <sup>-2</sup>	4,4·10 <sup>-2</sup>
	<b>Summe</b>	0,92	0,72	0,76	0,80	0,88	0,84
10 – 100 µm	Co-60	3,0·10 <sup>-3</sup>	2,6·10 <sup>-3</sup>	2,7·10 <sup>-3</sup>	2,3·10 <sup>-3</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>
	Cs-137	1,6·10 <sup>-3</sup>	1,2·10 <sup>-3</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	1,7·10 <sup>-3</sup>	1,6·10 <sup>-3</sup>
	Sr-90	1,1·10 <sup>-4</sup>	7,6·10 <sup>-5</sup>	7,2·10 <sup>-5</sup>	8,8·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-4</sup>	4,4·10 <sup>-5</sup>
	Am-241	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	2,1·10 <sup>-4</sup>	2,0·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>
	<b>Summe</b>	5,6·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-3</sup>	4,4·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-3</sup>	3,4·10 <sup>-3</sup>
Summe	Co-60	0,14	0,12	0,12	0,11	9,6·10 <sup>-2</sup>	7,6·10 <sup>-2</sup>
	Cs-137	0,72	0,60	0,64	0,64	0,76	0,72
	Sr-90	4,8·10 <sup>-3</sup>	3,6·10 <sup>-3</sup>	3,4·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-3</sup>	4,4·10 <sup>-3</sup>	2,0·10 <sup>-3</sup>
	Am-241	4,8·10 <sup>-2</sup>	2,4·10 <sup>-2</sup>	2,7·10 <sup>-2</sup>	3,5·10 <sup>-2</sup>	4,0·10 <sup>-2</sup>	4,4·10 <sup>-2</sup>
	<b>Summe</b>	0,92	0,72	0,80	0,80	0,88	0,84

Für alle Altersklassen wird die potentielle Exposition hauptsächlich durch Co-60, Cs-137 und Am-241 verursacht. Etwa 99 % der potentiellen Exposition entsteht dabei durch Partikel mit einem AED kleiner 10 µm. Die höchste Exposition ergibt sich für die Altersklasse bis 1 Jahr mit 0,92 mSv. Für diese Altersklasse beläuft sich der Anteil der  $\gamma$ -Bodenstrahlung an der potentiellen Exposition auf ca. 44 %. Ingestion trägt zu ca. 53 % bei. Der Anteil von Inhalation und  $\beta$ -/ $\gamma$ -Submersion beträgt weniger als 1,3 %. Für die Altersklasse der Erwachsenen (> 17 Jahre) belaufen sich die Anteile auf etwa 37 % für  $\gamma$ -Bodenstrahlung, 57 % für Ingestion und 6 % für Inhalation und  $\beta$ -/ $\gamma$ -Submersion.

Die Ergebnisse für die potentiellen Organdosen der am höchsten belasteten Altersklasse bis 1 Jahr sind in Tabelle 4-9 angegeben.

Tabelle 4-9: Potentielle Organdosis am ungünstigsten Aufpunkt beim Brand eines Gebäudes im LasmAaZ für die am höchsten belastete Altersklasse bis 1 Jahr

Organ	Potentielle Dosis [mSv]							Ausschöpfung
	$\gamma$ -Boden	$\gamma$ -Subm.	$\beta$ -Subm.	Inhalation	Subm. und Inhalation	Ingestion	Summe	
ET Luftwege	0,48	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,40	0,88	0,60%
Lunge	0,44	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,40	0,88	0,57%
Blase	0,40	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,84	0,56%
Brust	0,44	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,34	0,80	0,53%
Gehirn	0,44	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,38	0,80	0,54%
Haut	0,48	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,34	0,80	0,16%
Hoden	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,84	1,65%
Knochenoberfläche	0,44	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	1,4	2,0	0,67%
Leber	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,56	1,0	0,65%
Speiseröhre	0,37	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,76	0,51%
Magen	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,88	0,57%
Dünndarm	0,38	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,84	0,55%
Oberer Dickdarm	0,39	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,60	0,96	0,65%
Unterer Dickdarm	0,38	$9,2 \cdot 10^{-7}$	0	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,92	1,3	0,87%
Dickdarm	0,39	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,72	1,1	0,75%
Milz	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,80	0,54%
Muskel	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,39	0,80	0,53%
Nebennieren	0,38	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,80	0,54%
Nieren	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,84	0,56%
Ovarien	0,39	$9,2 \cdot 10^{-7}$	0	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	0,48	0,84	1,71%
Pankreas	0,37	$9,6 \cdot 10^{-7}$	0	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,80	0,54%
Rotes Knochenmark	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,56	1,0	1,97%
Schilddrüse	0,48	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,88	0,59%
Thymus	0,40	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,40	0,80	0,54%
Uterus	0,36	$9,2 \cdot 10^{-7}$	0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,44	0,80	1,58%
Effektive Dosis	0,40	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,48	0,92	1,81%

Die höchste Ausschöpfung des Planungswertes gemäß § 194 StrlSchV ergibt sich für die potentielle Organdosis des Roten Knochenmarks Dosis (Planungswert 50 mSv) mit 2 %. Somit werden die Planungswerte für das Ereignis des Brandes eines Gebäudes im LasmAaZ deutlich unterschritten.



### **4.3. Bewertung**

Sowohl für das Ereignis „Absturz eines Gebindes“ als auch für das Ereignis „Brand eines Gebindes“ liegt die maximal zu erwartende potentielle Dosis deutlich unterhalb des Planungswerts. Die Altersgruppe der Säuglinge ( $\leq 1$  Jahr) ist in beiden Fällen die potentiell am stärksten belastete Altersgruppe. Für das Ereignis „Absturz eines Containers“ schöpft die potentielle Effektivdosis mit 0,15 mSv den Planungswert von 50 mSv zu ca. 0,3 % aus.

Bei der Betrachtung für das Ereignis „Brand eines Containers im Handhabungsbereich des Las-mAaZ“ ergibt sich die höchste Ausschöpfung durch die potentielle Effektivdosis von 0,92 mSv bei der Altersgruppe der Säuglinge mit 1,8 %.

## **5. QUELLEN**

- [ATG 17]      **ATOMGESETZ**  
Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren  
(Atomgesetz)  
Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565)  
zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808)
- [ATG 11]      **ATOMGESETZ**  
Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren  
(Atomgesetz)  
Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das  
zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704) geändert worden ist
- [BFS 14]      **BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ**  
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand:  
Dezember 2014) – Endlager Konrad –  
Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung; SE-IB-29/08-REV-2
- [BMI 83]      **BUNDESMINISTERIUM DES INNEREN**  
Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien des BMI zur Beurteilung der Auslegung  
von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV  
Bekanntmachung von Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission vom 18. Oktober  
1983 BAnz Nr. 245a, 31.12.1983
- [BMU 00]      **BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT**  
Begründung (zur Neufassung der StrlSchV), Stand 04.08.2000
- [BMU 01]      **BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT**  
Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition  
vom 23. Juli 2001  
Bundesanzeiger. Nr. 160 a/b vom 28. August 2001
- [BMU 02]      **BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT**  
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische  
Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)  
GMBI. Nr. 25 - 29, 30.07.2002
- [BMU 07]      **BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT**  
Entwicklung, Validierung und Bereitstellung eines atmosphärischen Ausbreitungsmodells  
für luftgetragene radioaktive Stoffe der Basis des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 der  
neuen TA Luft.  
GRS mbH Köln, Schriftenreihe Umweltpolitik BMU-2007-710, Bonn, 2007



- [DIN 93]      DIN EN 481  
Arbeitsplatzatmosphäre – Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel  
Berlin: Beuth 1993
- [DOE 06]      U.S. DEPARTMENT OF ENERGY  
Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities  
DOE-HDBK-3014-2006, U.S. Department of Energy, Washington. D.C. 20585  
October 1996, Reaffirmation May 2006
- [ESK 13]      ENTSORGUNGSKOMMISSION  
ESK-Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland;  
Teil 2: Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, stationäre Einrichtungen zur Konditionierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle  
Stellungnahme der Entsorgungskommission 11.07.2013
- [GRS 09]      GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (GRS) MBH  
Transportstudie Konrad 2009  
Sicherheitsanalyse zur Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad  
Dezember 2009 mit Corrigendum vom April 2010  
GRS-256
- [GRS 13]      GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (GRS) MBH  
Vertiefung und Ergänzung ausgewählter Aspekte der Abfalltransportrisikoanalyse für die Standortregion der Schachtanlage Konrad  
GRS-A-3684, Februar 2013
- [GRS 17]      GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (GRS) MBH  
Überprüfung des unfallbedingten Freisetzungsverhaltens bei der Beförderung radioaktiver Stoffe  
GRS-482, Oktober 2017
- [KKK 15]      KERNKRAFTWERK KRÜMMEL GMBH & CO. OHG  
Antrag nach § 7 Abs. 3 AtG auf Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Krümmel  
24.08.2015
- [KKK 16]      KERNKRAFTWERK KRÜMMEL GMBH & Co. oHG  
Antrag auf Genehmigung nach § 7 Strahlenschutzverordnung zum Umgang mit radioaktiven Stoffen in einem neu zu errichtenden Lager für radioaktive Abfälle und Reststoffe  
Schreiben an das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein  
13.12.2016

- [MCC 07] McCLURE, P  
In-Facility Transport Modeling (Leak Path Factor Determination)  
Nuclear Design and Risk Analysis Group Los Alamos National Laboratory  
Presented to FCOG 2007, Revised May 2007  
LA-UR-05-2879
- [NIS 13] NIS  
Stilllegung und Beseitigung des Kernkraftwerkes Krümmel; Teil 1: Technik  
Stand: 31.12.2013
- [NRC 98] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION  
Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook  
NUREG / CR - 6410, 1998
- [SER 10] SERCO  
Release Fractions from Waste Packages Exposed to Fire  
Prepared for NDA (Nuclear Decommissioning Authority, Radioactive Waste Management  
Directorate, UK), SERCO/TCS/6663/01 Issue 1, November 2010
- [SSG 17] GESETZ ZUM SCHUTZ VOR DER SCHÄDLICHEN WIRKUNG IONISIERENDER STRAHLUNG  
(STRAHLENSCHUTZGESETZ – STRLSCHG)  
Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), zuletzt geändert durch Artikel 2  
des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966)
- [SSK 03] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION  
Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Be-  
rechnung der Strahlenexposition. Empfehlung der SSK verabschiedet in der 186. Sitzung am  
11.09.2003
- [SSV 17] STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (STRLSCHV) IN DER FASSUNG VOM 20. JULI 2001  
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzver-  
ordnung - StrlSchV)  
vom 20. Juli 2011 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459)  
zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114)
- [SSV 18] VERORDNUNG ZUM SCHUTZ VOR DER SCHÄDLICHEN WIRKUNG IONISIERENDER STRAHLUNG  
(STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG – STRLSCHV)  
Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I Nr. 41 vom 05. Dezember  
2018, S. 2034)