

Thema/Anlass

**Berechnung der potentiellen Strahlenexposition infolge des Absturzes eines Militärlflugzeuges auf das LasmAaZ (LasmAaZ)**  
LAK/010/045

21.08.2019	-
Datum	Revision

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

[Redacted]
------------

Zusammenfassung    Textseiten 76    Anlagen

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 10.08.2018 wird durch die Firma Brenk Systemplanung GmbH für das auslegungsüberschreitende Ereignis des Absturzes eines Militärlflugzeuges die potentielle Exposition in der Umgebung des LasmAaZ ermittelt.

Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen werden unter Berücksichtigung standortspezifischer Daten für die umliegende Wohnbebauung und Arbeitsstätten durchgeführt. Die berechneten Dosiswerte unterschreiten die Eingreifrichtwerte der Strahlenschutzkommission.

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

	Geprüft	Geprüft	Geprüft	Freigegeben
Name:	[Redacted]			
Abt. Kurzzeichen:	[Redacted]			
Datum:	[Redacted]			
Unterschrift:	[Redacted]			

Verteiler (falls nur Zusammenfassung zur Kenntnisnahme: "z.K" anfügen):  
intern: LasmAaZ  
extern: MELUND, Ref. 70  
          ARGE SAK



Endbericht

**Berechnung der  
potentiellen Strahlenexposition  
infolge des Absturzes  
eines Militärflugzeugs  
auf das LasmAaZ**

BS-Projekt-Nr. 1705-03  
Bestellung Nr. EA8-4503751617

erstellt im Auftrag der  
Kernkraftwerk Krümmel GmbH & Co. oHG



durch die  
Brenk Systemplanung GmbH



20.08.2019

**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:

- [REDACTED]
- [REDACTED]

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
[REDACTED]		



## **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Bericht soll für das auslegungsüberschreitende Ereignis des Absturzes eines Militärflugzeugs auf das LasmAaZ des Kernkraftwerks Krümmel (KKK) sowohl ohne als auch mit anschließendem Folgebrand die potentielle Exposition an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten ermittelt werden. Zur Ermittlung der am stärksten betroffenen Gebinde wird nicht von einer speziellen realen Anordnung der Gebinde im Lager Kredit genommen, sondern der ungünstigste Fall ermittelt. Ein Flugzeugabsturz auf das LasmAaZ ist als auslegungsüberschreitend anzusehen und wird als Ereignis dem Restrisikobereich zugeordnet.

Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen werden unter Verwendung standortspezifischer meteorologischer Daten und unter Berücksichtigung tatsächlicher Wohnbebauungen und Arbeitsstätten mit den dort jeweils anzusetzenden Aufenthaltszeiten durchgeführt. Sowohl für Wohnbebauungen wie auch für Arbeitsstätten werden alle Altersgruppen betrachtet, um beispielsweise auch einen Kinderhort zu berücksichtigen. Über eine probabilistische Analyse werden die Werte für die 7-Tage- und 1-Jahres-Dosis bestimmt, unterhalb derer 95 % der ermittelten Maximalwerte der Dosis bei einer Ausbreitungssituation liegen. Für das Aktivitätsinventar der mechanisch und thermisch belasteten Gebinde wird eine Vollausschöpfung der Summenformel der gemäß Einlagerungsbedingungen des Endlagers Konrad zulässigen Aktivitäten angenommen (Summenwert = 1). Da dies nur für maximal 1 % der im Endlager Konrad einzulagernden nicht störfallfesten Gebinde möglich ist, ist dieser Ansatz sehr konservativ.

Für die 7-Tage-Folgedosis ergibt sich die höchste potentielle Exposition an Orten mit Wohnbebauung mit ca. 0,4 mSv für die Altersgruppe der Erwachsenen, da in diesem Fall der Anteil durch Inhalation noch relevant ist. Für Arbeitsstätten ergibt sich die höchste potentielle Folgedosis ebenfalls für die Altersgruppe der Erwachsenen mit ca. 0,3 mSv im 95 %-Quantil. Für die 1-Jahres-Folgedosis ist jeweils die Altersgruppe der Säuglinge potentiell am stärksten betroffen. Dabei ergeben sich im 95 %-Quantil ca. 2,0 mSv (Arbeitsstätten) bzw. 8,3 mSv (Wohnbebauung).



## 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>1</b>
<b>2.1.1. Freisetzungsteile .....</b>	<b>2</b>
2.1.1.1. Freisetzungsteile nach Transportstudie Konrad .....	2
2.1.1.2. Freisetzungsteile nach NDA .....	5
2.1.1.3. Nutzung der Freisetzungsteile in diesem Bericht .....	8
<b>2.1.2. Absturzscenario .....</b>	<b>9</b>
2.1.2.1. Mechanische Belastungen .....	9
2.1.2.2. Thermische Belastungen .....	11
<b>2.2. Ausbreitungsmodell .....</b>	<b>13</b>
2.2.1. Meteorologische Daten .....	14
2.2.2. Ablagerungsfaktoren .....	14
2.2.3. Gebäudeeinfluss .....	15
2.2.4. Geländeeinfluss .....	16
2.2.5. Quellüberhöhung .....	16
2.2.6. Gauß-Fahnenmodell für die Dosis an der Staatsgrenze .....	17
<b>2.3. Dosisberechnung .....</b>	<b>18</b>
2.3.1. Expositionspfade .....	18
2.3.2. Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen .....	19
2.3.2.1. Atemraten .....	19
2.3.2.2. Expositionszeiten bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen .....	19
2.3.3. Dosiskoeffizienten .....	20
<b>2.4. Bewertungsmaßstab für auslegungsüberschreitende Ereignisse .....</b>	<b>20</b>
2.4.1. Eingreifrichtwerte für die Dosis .....	20
2.4.2. Ungünstigste Aufpunkte .....	22
<b>3. STANDORTGEGEBENHEITEN .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. Lage und Gebäude .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigste Aufpunkte .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3. Aktivitätsinventar .....</b>	<b>28</b>
3.3.1. Nuklidvektor für Aktivierung .....	28
3.3.2. Nuklidvektor für Kontamination .....	29
3.3.3. Berücksichtigte Aktivitäten .....	30
3.3.4. Zuordnung der Freisetzungsteile zu den Gebinden .....	33



3.5. Bemerkungen zur Methodik bei der probabilistischen Ausbreitungsrechnung.....	42
<b>4. DOSISBERECHNUNGEN .....</b>	<b>44</b>
4.1. Ausbreitungsberechnungen .....	44
4.1.1. Bestimmung der effektiven Emissionshöhe.....	44
4.1.2. Rechengitter .....	45
4.2. Absturz eines Militärflugzeuges ohne Folgebrand .....	46
4.2.1. Quelltermmittlung .....	46
4.2.1.1. Betroffenes Inventar .....	46
4.2.1.2. Freigesetzte Aktivität.....	47
4.2.2. Bestimmung des 95 %-Quantils für die potentielle Exposition.....	48
4.2.3. Dosis an der Grenze des Staatsgebiets.....	49
4.3. Absturz eines Militärflugzeuges mit Folgebrand.....	52
4.3.1. Quelltermmittlung .....	52
4.3.1.1. Betroffenes Inventar .....	52
4.3.1.2. Freigesetzte Aktivität.....	53
4.3.2. Bestimmung des 95 %-Quantils für die potentielle Exposition.....	56
4.3.3. Dosis an der Grenze des Staatsgebiets.....	57
4.4. Bewertung.....	59
<b>5. QUELLEN .....</b>	<b>60</b>
<b>6. ANHANG.....</b>	<b>1</b>
6.1. Berechnung der effektiven Freisetzunganteile für Geschwindigkeiten größer als in der Transportstudie Konrad .....	1

## TABELLENVERZEICHNIS

Seite:

Tabelle 2-1:	Zuordnung zwischen Abfallproduktgruppe (APG) nach [BFS 14] und Abfallgebindegruppe (AGG) nach [GRS 17].....	3
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) .....	3
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] .....	4
Tabelle 2-4:	Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], hier relevante Gruppen und Elemente sind fett dargestellt .....	6
Tabelle 2-5:	Temperaturabhängige Freisetzungsfaktoren für exemplarische Abfallarten und Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], keine Gebinderückhaltung .....	7
Tabelle 2-6:	Freisetzungsteile nach [SER 10] für die betrachteten Gebindearten und die hier relevanten Flüchtigkeitsgruppen .....	7
Tabelle 2-7:	Parameter und Berechnungsgrößen für den Aufprall eines Flugzeugs auf das LasmAaZ .....	11
Tabelle 2-8:	Washoutkoeffizienten, Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten nach [BMU 14], basierend auf [BMU 07] .....	15
Tabelle 2-9:	Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [BMU 14] (basierend auf [SSK 03] für das Emissionszeitintervall 0 – 8 Stunden) .....	19
Tabelle 2-10:	Unterstellte Aufenthaltszeiten für Bereiche mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten.....	20
Tabelle 2-11:	Eingreifrichtwerte bezüglich effektiver Dosis für bestimmte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationszeiten und Expositionspfade nach [SSG 17], [SSK 14] und [SSK 15] .....	22
Tabelle 3-1:	Nuklidvektor A für Aktivierung .....	29
Tabelle 3-2:	Nuklidvektor K für Kontamination .....	30
Tabelle 3-3:	Zur Einlagerung im LasmAaZ vorgesehene Behältertypen nach [NIS 13] (exemplarisch) .....	30
Tabelle 3-4:	Aktivitätsgrenzwerte für die hier relevanten Nuklide nach [BFS 14] in Abhängigkeit der Abfallbehälterklasse (ABK) und der Abfallproduktgruppe (APG). Dabei ist zusätzlich die Summenformel einzuhalten.....	31

Tabelle 3-5:	Maximal zulässige Einzelaktivitäten in den Gebindetypen sowie Zuordnung von APG bzw. Abfalltyp. Die angegebenen AGG wurden gemäß Tabelle 2-2 zugeordnet. Die Aktivitäten ergeben sich aus der Berücksichtigung der Nuklidvektoren und der Einhaltung der Aktivitätsgrenzwerte nach [BFS 14]. Die bei Betrachtung eines auslegungüberschreitenden Ereignisses radiologisch wenig relevanten Nuklide H-3 und C-14 sind zur Übersichtlichkeit weggelassen. ....	32
Tabelle 3-6:	Verteilung des gesamten Aktivitätsinventars auf die Gebinde .....	33
Tabelle 3-7:	Bei der Bestimmung der Quellterme verwendete Freisetzungsteile (mechanische Belastung).....	34
Tabelle 3-8:	Bei der Bestimmung der Quellterme verwendete Freisetzungsteile (thermische und mechanische Belastung) .....	34
Tabelle 3-9:	Gewichtungsfaktoren für die Bewertungsparameter bei der Bestimmung des repräsentativen Jahres nach [VDI 15]. ....	35
Tabelle 3-10:	Einteilung der Windgeschwindigkeitsklassen nach der TA Luft [BMU 02] .....	36
Tabelle 3-11:	Bewertungsparameter $\chi^2$ und TQ für die Jahre im betrachteten Zeitraum sortiert nach $\chi^2$ .....	37
Tabelle 3-12:	Niederschlagsklassen für das repräsentative Jahr 2013 .....	40
Tabelle 4-1:	Bei den ARTM-Ausbreitungsrechnungen verwendete Rechengitter .....	46
Tabelle 4-2:	Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand im LasmAaZ betroffene Aktivitäten .....	46
Tabelle 4-3:	Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand im LasmAaZ freigesetzte Aktivitäten .....	47
Tabelle 4-4:	Werte für das 95 %-Quantil der potentiellen Folgedosis an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten für den Flugzeugabsturz ohne Folgebrand .....	49
Tabelle 4-5:	Potentielle effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand.....	50
Tabelle 4-6:	Beiträge der Nuklide zur potentiellen effektiven Dosis in mSv an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand .....	51
Tabelle 4-7:	Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ thermisch und mechanisch betroffene Aktivitäten (BK 8).....	52
Tabelle 4-8:	Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ nur thermisch betroffene Aktivitäten (BK 2) .....	53
Tabelle 4-9:	Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ freigesetzte Aktivitäten (mechanische und thermische Belastung).....	54

Tabelle 4-10:	Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ freigesetzte Aktivitäten (thermische Belastung) .....	55
Tabelle 4-11:	Werte für das 95 %-Quantil der potentiellen Folgedosis an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten für den Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand.....	57
Tabelle 4-12:	Potentielle effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand.....	58
Tabelle 4-13:	Beiträge der Nuklide zur potentiellen effektiven Dosis in mSv an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand.....	59

## **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Seite:

Abbildung 3-1:	Kernkraftwerk Krümmel, Fotografie vom gegenüberliegenden Elbufer .....	23
Abbildung 3-2:	KKK-Betriebsgelände (blau) und auf das geplante LasmAaZ bezogener Sektoreinteilung (Karte erstellt auf Basis von OpenStreetMap Kartenmaterial, <a href="http://www.openstreetmap.org">www.openstreetmap.org</a> , © OpenStreetMap-Mitwirkende).....	24
Abbildung 3-3:	Ausschnitt des KKK-Geländes mit Lage des geplanten LasmAaZ [ESP 16].....	25
Abbildung 3-4:	Schnittdarstellung des geplanten LasmAaZ [ESP 16] .....	25
Abbildung 3-5:	Lage des LasmAaZ im Bezug zu den Grenzen des deutschen Staatsgebiets mit Sektoreinteilung und Angabe der Entfernungen in km (erstellt auf Basis von Google Earth™ Pro Kartenservice Material).....	26
Abbildung 3-6:	Karte der Umgebung (erstellt auf Basis von OpenStreetMap Kartenmaterial, <a href="http://www.openstreetmap.org">www.openstreetmap.org</a> , © OpenStreetMap-Mitwirkende) mit betrachteten Bereichen für Wohnbebauung (rote Schraffur) und Arbeitsstätten (grüne und rote Schraffur) sowie Sektoreinteilung.....	27
Abbildung 3-7:	Zeitverlauf der relativen Anteile der durch Aktivierung entstehenden Nuklide Fe-55, Co-60 und Ni-63 an der durch diese Nuklide resultierenden Gesamtaktivität, als Funktion der Zeit .....	29
Abbildung 3-8:	Windrichtungshäufigkeit am Standort, repräsentatives Jahr 2013 (Häufigkeit auf den Radialachsen, Sektornummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet).....	38
Abbildung 3-9:	Verteilung der Niederschlagsmengen nach Sektoren für das repräsentative Jahr 2013 (mittlere Jahresniederschlagsmenge auf den Radialachsen, Sektornummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet).....	39



Abbildung 3-10:	Verteilung der Häufigkeiten einzelner Niederschlagsklassen für das repräsentative Jahr 2013 .....	40
Abbildung 3-11:	Verteilung der Häufigkeiten der Windgeschwindigkeitsklassen für das repräsentative Jahr 2013 .....	41
Abbildung 3-12:	Verteilung der Häufigkeiten der Ausbreitungsklassen (A bis F) für das repräsentative Jahr 2013 .....	42
Abbildung 4-1:	Vergleich für die Überhöhung $H$ in einer Entfernung $x$ von der Emissionsquelle bei unterschiedlichen Radien des Kerosinpools.....	45
Abbildung 4-2:	Histogramm der kumulierten Häufigkeit für die 1-Jahres-Folgedosis (Säuglinge) an Orten mit Wohnbebauung (Häufigkeit für effektive Dosis kleiner als $D$ ) mit Markierung für das 95 %-Quantil .....	48
Abbildung 4-3:	Histogramm der kumulierten Häufigkeit für die 1-Jahres-Folgedosis (Säuglinge) an Orten mit Wohnbebauung (Häufigkeit für effektive Dosis kleiner als $D$ ) mit Markierung für das 95 %-Quantil (Freisetzung aus Gebinden der APG 01 – 02).....	56



## **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
DR	beschädigter Anteil (damage ratio)
FKZ	Filterkonzentrat
KC	Konrad-Container
KKB	Kernkraftwerk Brunsbüttel
KKK	Kernkraftwerk Krümmel
Lasma	Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort KKB
LasmaaZ	Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle am Zwischenlager
LPF	zur Ausbreitung gelangender Anteil (leakpath factor)
MR	betroffenes Inventar (material at risk)
psi	pound per square-inch (1 psi $\approx$ 6.895 Pa)
RF	einatembarer Anteil bzw. Anteil der zur Exposition beiträgt (respirable fraction)
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
ST	Freisetzungsterm (source term)
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV <sup>2017</sup>	Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001, zuletzt geändert am 27. Januar 2017
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SZK	Standortzwischenlager Krümmel
VKZ	Verdampferkonzentrat

## **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 Strahlenschutzverordnung alter Fassung (StrlSchV<sup>2017</sup>) [SSV 17] zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen im Sinne des § 2 Abs. 3 Atomgesetz (AtG) [ATG 17] gestellt [KKK 16].

In diesem Bericht soll für das auslegungsüberschreitende Ereignis des Absturzes eines Militärflugzeugs sowohl ohne als auch mit anschließendem Folgebrand die potentielle Exposition an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten ermittelt werden. Zur Ermittlung der am stärksten betroffenen Gebinde wird nicht von einer speziellen Anordnung der Gebinde im Lager Kredit genommen, sondern der ungünstigste Fall ermittelt. Ein Flugzeugabsturz auf das LasmAaZ ist als auslegungsüberschreitend anzusehen und wird als Ereignis dem Restrisikobereich zugeordnet.

Zur Bewertung der ermittelten potentiellen Expositionen werden als Maßstab verschiedene Dosis-kriterien für die Einleitung einschneidender Maßnahmen des Katastrophenschutzes herangezogen.

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

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 in den nächsten Abschnitten beschrieben werden.

Zusätzlich wird in diesem Abschnitt der für den vorliegenden Bericht verwendete Bewertungsmaßstab erläutert.

### **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*: einatembare 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.“*

Analog dazu wird in [BMU 14] formuliert:

*„Falls es möglich ist, bestimmten Quelltermen (resultierend aus einem der zu Grunde gelegten Tatzszenarien) eine relative Häufigkeit zuzuordnen, so kann dies in Form einer Quelltermprobabilistik bei der probabilistischen Konsequenzanalyse (Abschnitt 4.4.2<sup>1</sup>) berücksichtigt werden.“*

Betrachtungen, die sich auf das maximal mögliche Aktivitätsinventar (bezüglich des jeweiligen Gebäudes bzw. der Gebäudeteile z. B. aus Genehmigungswerten bzw. bezüglich einzelner Gebinde z. B. aus Annahmebedingungen) beziehen (100 %-Quantil) sind demnach gegenüber dem in [BMI 83] und [BMU 14] beschriebenen Vorgehen (95 %-Quantil) konservativ.

Details und Ergebnisse der Quelltermmittlung für den Fall ohne und mit Folgebrand werden in den Abschnitten 4.2.1 und 4.3.1 beschrieben.

## **2.1.1. Freisetzungsteile**

### **2.1.1.1. Freisetzungsteile nach Transportstudie Konrad**

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

Die Art des betroffenen Gebindes und die Struktur des Inhalts wird durch die in Tabelle 2-1 aufgeführten Abfallgebindergruppen (AGG) beschrieben. In den Anforderungen an endzulagernde radio-

---

<sup>1</sup> In diesem Abschnitt in [BMU 14] wird das 95 %-Quantil als Bewertungsmaßstab festgelegt.

aktive 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 Abfallgebindegruppe (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 Brandklassen 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 2.1.1.2 diskutierten Ergebnisse aus [SER 10] zur unterschiedlichen Freisetzbarkeit einzelner chemischer Elemente wird im Weiteren als konservativ abdeckende Vorgehensweise ein Korrekturfaktor für die thermische Freisetzung der Elemente Kobalt, Americium und Strontium von 0,1 gegenüber der thermischen Freisetzung von Cäsium<sup>2</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 2.3.1) 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 2.2.2).

#### **2.1.1.2. Freisetzungsteile nach NDA**

Mit [SER 10] liegt ein für die Nuclear Decommissioning Authority (NDA, UK) verfasster Bericht vor, in dem die Freisetzung aus Abfallbinden 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>2</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>
<b>I</b>	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
<b>III</b>	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
<b>VI</b>	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 1.000°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 Freisetzunganteil für das Gebinde ermittelt.

In Tabelle 2-5 sind exemplarisch die temperaturabhängigen Freisetzungsteile 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 Freisetzungsteilen. 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 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 1.000°C sind in Tabelle 2-6 zusammengestellt.

Tabelle 2-6: Freisetzungsteile nach [SER 10] für die betrachteten Gebindearten und die hier relevanten Flüchtigkeitsgruppen

Abfallgebilde	Freisetzungsteil 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 Freisetzungsanteile von  $3 \cdot 10^{-2}$  (500-l-Fass mit homogen verteiltem Inhalt). In allen Fällen liegen die Freisetzungsanteile für Co, Sr, Fe, Ni (alle Flüchtigkeitsgruppe IV) und Am (Flüchtigkeitsgruppe V) um mindestens einen Faktor 10 unter den jeweiligen Freisetzungsanteilen für Cs.

### **2.1.1.3. Nutzung der Freisetzungsanteile in diesem Bericht**

Bei der Betrachtung des Flugzeugabsturzes ohne Folgebrand werden die Freisetzungsanteile aus der Transportstudie Konrad in der Belastungsklasse BK 7 für die jeweilige Abfallgebindegruppe verwendet. Nach [GRS 13] wurde bei der Herleitung der mechanischen Freisetzungsanteile in [GRS 09] (und damit auch in [GRS 17]) von einem Container des Typs IV ausgegangen. Da die mechanischen Freisetzungsanteile 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.

Bei der Betrachtung des Folgebrandes wird in diesem Bericht zwischen den nur thermisch betroffenen Gebinden und den mechanisch und thermisch betroffenen Gebinden unterschieden. Bei den nur thermisch belasteten Gebinden werden die Freisetzungsanteile aus der Transportstudie Konrad (BK 2) verwendet, wobei die Werte für andere Nuklide als Cs mit einem Faktor 0,1 korrigiert werden (nur für AED bis  $10\ \mu\text{m}$ ). Für die mechanisch und thermisch betroffenen Konrad-Container wird von einem Verlust der Behälterintegrität ausgegangen. Somit wird kein Kredit von Behältereigenschaften genommen, sondern es werden direkt die Freisetzungsanteile nach Tabelle 2-5 gemäß [SER 10] verwendet. Aus den Betrachtungen im vorherigen Abschnitt (2.1.1.2) wird deutlich, dass bei gegebener Gebinderückhaltung die Freisetzungsfaktoren um mindestens einen Faktor 10 geringer wären.

Für Aktivierung in Metallen wird generell unterstellt, dass keine Freisetzung erfolgt.

Für Kontamination an Metallen werden die zu einer Temperatur von  $1.000^\circ\text{C}$  extrapolierten Freisetzungsanteile nach [SER 10] aus Tabelle 2-5 verwendet. Damit ergeben sich Werte von  $3 \cdot 10^{-4}$  für Cs-137,  $2 \cdot 10^{-5}$  für Co-60, Ni-63, Fe-55 und Sr-90 sowie  $7,7 \cdot 10^{-6}$  für Am-241.

Für kompaktierte oder zementierte Abfälle werden die Freisetzungsanteile nach [SER 10] aus Tabelle 2-5 verwendet. Somit ergeben sich Werte von  $2 \cdot 10^{-2}$  für Cs-137,  $1 \cdot 10^{-3}$  für Co-60, Ni-63, Fe-55 und Sr-90 sowie  $2 \cdot 10^{-5}$  für Am-241.

Für sonstige Abfälle werden konservativ die größten Freisetzungsanteile der in [SER 10] betrachteten Abfallarten verwendet. Damit ergeben sich Freisetzungsanteile von 0,3 für Cs-137, 0,01 für Co-60, Ni-63, Fe-55 und Sr-90 sowie  $3 \cdot 10^{-4}$  für Am-241.

Eine genaue Zuordnung der Freisetzungsanteile zu den in den Gebinden befindlichen Reststoffen bzw. Nukliden im betrachteten Szenario ist in Abschnitt 3.3.4 aufgeführt.

Die Freisetzungsanteile für Partikel mit einem AED  $> 10\ \mu\text{m}$  ergeben sich gemäß der Transportstudie Konrad [GRS 17] aus der mechanischen Belastung und sind unabhängig von der thermischen Belastung. Daher werden diese Freisetzungsanteile ohne Anwendung einer weiteren Korrektur direkt aus [GRS 17] verwendet.

### **2.1.2. Absturzscenario**

Die Betrachtung des Absturzscenario eines Militärflugzeugs erfolgt für eine Gesamtmasse des Flugzeugs inklusive Kerosin von 24 Mg und für eine Kerosinmenge von 6,2 m<sup>3</sup> (entsprechend ca. 5 Mg). Für den Absturz wird von einer Geschwindigkeit von 215 m/s (entsprechend 774 km/h) ausgegangen.

In der Transportstudie Konrad [GRS 17] sind Freisetzungsteile nur für Belastungsklassen angegeben, die von Auftreffgeschwindigkeiten bis maximal 110 km/h (31 m/s) ausgehen. Die ursprüngliche Geschwindigkeit des Flugzeugs reduziert sich durch den inelastischen Stoß beim Auftreffen auf die Lagerhalle. Aus der Restgeschwindigkeit und den Massen des Flugzeugs und des von der Zerstörung betroffenen Teils der Lagerhalle wird die gesamte, zur Beschädigung von Gebinden zur Verfügung stehende Energie berechnet. Aus dem Verhältnis dieser Energie und der kinetischen Energie eines Gebindes (Masse 10 Mg Behälter des Typs II und 20 Mg für die anderen Gebinde) mit der Geschwindigkeit 110 km/h (Belastungsklassen BK 7, 8 und 9) ergibt sich die Anzahl der maximal von Beschädigungen dieser Belastungsklasse betroffenen Gebinde. Weitere Erläuterungen sind in Kapitel 2.1.2.1 zu finden. Die Äquivalenz des hier verwendeten Ansatzes zur Berechnung der Anzahl der mechanisch betroffenen Gebinde aus dem Energieeintrag und der Verwendung der Freisetzungsteile aus der Transportstudie Konrad mit einer direkten Skalierung der Freisetzungsteile aus der Transportstudie Konrad über den Energieeintrag wird in Abschnitt 6.1 im Anhang gezeigt.

Durch das beim Einschlag freigesetzte Kerosin kann es zu einem Lachenbrand innerhalb des LasmAaZ kommen. Eine Beschreibung der dabei auftretenden thermischen Belastungen und der damit verbundenen potentiellen Aktivitätsfreisetzungen wird in Kapitel 2.1.2.2 gegeben.

Auf dem Gelände in der Nähe des KKK befinden sich viele Hindernisse für den Anflug eines Flugzeugs, insbesondere eine komplexe Geländestruktur. Ein großer Teil des LasmAaZ wird in den Elbhang hinein gebaut. Die Wahrscheinlichkeit, das LasmAaZ durch einen gezielten Anflug mit einem großen Flugzeug zu treffen, ist extrem gering (siehe hierzu Abschnitt 3.1). Lediglich bei einem Anflug aus Richtung Nordwest nach dem Abbau des Werkstattgebäudes (siehe Abbildung 3-4) kann das LasmAaZ direkt getroffen werden. Hier erfolgt der potentielle Aufprall allerdings zunächst auf das Funktionsgebäude. Konservativ wird im Folgenden die zum Durchdringen der Wand des Funktionsgebäudes benötigte Energie nicht berücksichtigt, sondern nur die Außenwand des Lagergebäudes berücksichtigt.

Beim thermischen Belastungsszenario wird dagegen davon ausgegangen, dass die Tanks den ersten Aufprall auf die Wand des Funktionsgebäudes überstehen und es erst beim Eindringen in das Lagergebäude zur Kerosinfreisetzung kommt.

#### **2.1.2.1. Mechanische Belastungen**

Für die mechanische Belastung der Gebinde ist es notwendig, eine Abschätzung der Geschwindigkeit des Flugzeugs bzw. der Flugzeugteile nach dem Durchbrechen der Gebäudewand bzw. der aus der Wand herausgelösten Trümmerteile zu treffen.

Es existieren Betrachtungen über Energieerhaltung, bei denen von einem starren Projektil ausgegangen wird (also kein Energieverlust durch Deformation des Projektils) [NEI 09]. Dabei teilt sich

die Anfangsenergie des Projektils in einen Anteil auf, der zur Perforation der Wand benötigt wird, sowie einen Anteil, mit dem sich danach das Projektil und das aus der Wand gebrochene Stück mit der Restgeschwindigkeit weiterbewegen. Die Größe des Bruchstücks aus der Wand wird dabei über einen Kegelstumpf (Konus) abgeschätzt, der maximal einen Öffnungswinkel von  $60^\circ$  besitzt.

Die zum Durchbrechen der Wand benötigte Mindestgeschwindigkeit  $v_p$  wird über die Gleichungen [2-1] und [2-3] aus [NEI 09] abgeschätzt. Dabei wird zunächst der Parameter  $\frac{x_c}{\alpha_c \cdot D}$  über

$$t_p = \alpha_p \cdot D \cdot \left( 2,2 \cdot \frac{x_c}{\alpha_c \cdot D} - 0,3 \cdot \left( \frac{x_c}{\alpha_c \cdot D} \right)^2 \right) \quad (\text{G 2-2})$$

bestimmt, wobei gemäß [NEI 09]  $\frac{x_c}{\alpha_c \cdot D} \leq 1,52$  gelten muss. Für  $t_p$  wird die Wanddicke eingesetzt,  $D$  ist der mittlere Außendurchmesser des Projektils,  $\alpha_p = 0,6$  ein Reduktionsfaktor und  $x_c$  eine Eindringtiefe. Der Reduktionsfaktor  $\alpha_c$  (in [NEI 09] mit 0,5 angegeben) wird nicht explizit benötigt. Durch Auflösen von Gleichung [2-1] aus [NEI 09]

$$\frac{x_c}{\alpha_c \cdot D} = \sqrt{4 \cdot \frac{K \cdot W \cdot N}{D} \cdot \left( \frac{v_p}{1000 \cdot D} \right)^{1,8}} \quad (\text{G 2-3})$$

nach  $v_p$  ergibt sich die Mindestgeschwindigkeit zum Durchdringen der Wand in ft/s. Hier muss der mittlere Außendurchmesser  $D$  des Projektils in Inch angegeben werden.  $W$  ist das Gewicht des Projektils in lbs.  $K$  ergibt sich über  $K = \frac{180}{\sqrt{f'_c}}$  aus der Druckfestigkeit  $f'_c$  von Beton (in psi), die

zur Abschätzung mit  $40 \text{ MPa} \approx 5800 \text{ psi}$  angenommen wurde. Der Faktor  $N$  berücksichtigt die Form des Projektils (0,72 für eine flache Form, 1 für sphärisches Ende, 1,14 für spitzes Ende).

Nur bei Überschreitung von  $v_p$  kann das Projektil (Flugzeug bzw. Triebwerk) in das Gebäude eindringen und dort Beschädigungen hervorrufen.

Eine Abschätzung des Anteils der zur Deformation des Flugzeugs notwendigen Energie findet in [MIT 02] statt. Dabei wird der Flugzeugrumpf als Hohlzylinder betrachtet, in dem sich die gesamte Masse des Rumpfes befindet und die Energie bestimmt, die zur Kompression dieses Zylinders notwendig ist. Allerdings ist dies eine überschätzende Annahme zur Deformationsenergie, weswegen nur ein Bruchteil davon verwendet werden darf.

Im vorliegenden Bericht wird von der Impulserhaltung ausgegangen. Es wird dabei implizit unterstellt, dass die zur Deformation der Gebäudewände benötigte Energie vom Flugzeug aufgebracht wird, deren genauer Anteil wird aber für die Berechnung nicht benötigt (vollständig inelastischer Stoß).

Der Impuls des Flugzeugs vor dem Aufprall (Geschwindigkeit  $v_0$ ) wird mit dem Impuls von Flugzeug und Beton nach dem Aufprall gleichgesetzt, wobei sich Flugzeug und Beton nach dem Aufprall mit der gleichen Geschwindigkeit  $v_r$  fortbewegen. Es gilt:

$$v_r = v_0 \cdot \frac{m_{\text{Projektil}}}{m_{\text{Projektil}} + m_{\text{Beton}}} \quad (\text{G 2-4})$$

Die Masse des aus der Wand „gestanzten“ Betons wird über einen Konus gemäß [NEI 09] bestimmt. Der durch den Durchmesser des Flugzeugrumpfs gegebene Anfangsdurchmesser im Beton erweitert sich dabei bis zum Austritt über einen Winkel von (maximal) 60°.

Über die aus der Anwendung des Impulssatzes berechneten Restgeschwindigkeiten lassen sich dann mit den Energie-Betrachtungen nach [NEI 09] und [MIT 02] auch Aussagen zum Anteil der zur Deformation benötigten Energie treffen.

Die resultierenden Parameter für das LasmAaZ beim betrachteten Absturz eines Flugzeuges sind in Tabelle 2-7 unter der Annahme, dass alle Trümmer und Flugzeugteile Gebinde treffen, angegeben. Die notwendigen Berechnungsschritte sind im Anhang (Abschnitt 6.1) beschrieben.

Tabelle 2-7: Parameter und Berechnungsgrößen für den Aufprall eines Flugzeugs auf das LasmAaZ

Parameter / Berechnungsgrößen	Militärflugzeug
Masse Flugzeug [Mg]	24
davon Treibstoff [Mg]	5
Durchmesser $D$ [m]	2
$v_0$ [m/s]	215
$v_0$ [km/h]	774
Anfangsenergie [MJ]	543
Wanddicke LasmAaZ [cm]	85
Aufprallgeschwindigkeit LasmAaZ [m/s]	193
Masse Beton im betroffenen Konus LasmAaZ [Mg]	20
Restgeschwindigkeit $v_r$ [m/s]	118
Restgeschwindigkeit $v_r$ [km/h]	425
notwendige Geschwindigkeit $v_p$ [m/s]	67
notwendige Geschwindigkeit $v_p$ [km/h]	242
Restenergie in Lagerhalle <sup>3</sup> [MJ]	262
Anzahl betroffene Gebinde (mit Masse 10 Mg) in BK 7	56
Anzahl betroffene Gebinde (mit Masse 20 Mg) in BK 7	28

### 2.1.2.2. Thermische Belastungen

Beim Aufprall des Flugzeugs auf das Gebäude kommt es zu einer Beschädigung der Tanks und damit zum Austritt von Kerosin. Ein Teil des Kerosins wird dabei fein zerstäubt, so dass es zu einem Feuerball kommt. Dieser ist nur von sehr kurzer Dauer, wodurch der Energieübertrag auf die Gebinde gering bleibt, so dass er für die weitere Schadensbetrachtung vernachlässigt wird.

Die Menge des Kerosins, das sich in der Halle verteilt und dadurch bei einem auf den Aufprall folgenden Brand betroffen ist, kann mittels [TIE 95] und [TIE 96] abgeschätzt werden. In [TIE 95]

<sup>3</sup> Energie, die nach dem Aufprall im Flugzeug bzw. Triebwerk und den Betontrümmern steckt (mit Restgeschwindigkeit  $v_r$ ), ohne Berücksichtigung des austretenden Kerosins

wird untersucht, wie viel Treibstoff sich in einer Lache sammeln kann. Dabei werden verschiedene Anfluggeschwindigkeiten und Anflugwinkel auf das Hindernis betrachtet. Man kommt dabei zu dem Schluss, dass ab einer Geschwindigkeit von 61 m/s unabhängig vom Anflugwinkel keine Lachenbildung mehr stattfindet. Gemäß [TIE 95] werden etwa 36 bis 53 % des Treibstoffs auf dem Boden verteilt, wobei nur maximal 5 % höher als 1 mm stehen. Der Rest wird fein zerstäubt und verdampft, bevor er den Boden erreicht. In der Zusammenfassung wird allerdings darauf verwiesen, dass dies nur gilt, wenn keine Kraterbildung auftritt. Zur Berücksichtigung auftretender Krater wird in [TIE 95] auf eine Folgestudie verwiesen, die mit [TIE 96] vorgelegt wurde. Der dort angegebene Teil, der bei steilem Auftreffen im Krater verbrennt, ist demnach als Lachenanteil zu verstehen. Das im aktuellen Fall vorhandene Gebäude bildet einen künstlichen Krater. Daher kann aus [TIE 95] und [TIE 96] geschlossen werden, dass in einem „optimalen Krater“ 30 % bis 50 % des Kerosins für einen Lachenbrand verbleiben.

Es wird im Folgenden konservativ abdeckend davon ausgegangen, dass bis zu 70 % des Kerosins in die Lagerhalle gelangen und ggf. zu einem Folgebrand führen.

Bei einem ggf. außerhalb der Hallen auftretenden Lachenbrand führt ein sehr schnelles Abfließen des Kerosins zu großflächigen Verteilungen und zu sehr kurzen Brenndauern<sup>4</sup>. Die thermische Wirkung eines Lachenbrandes außerhalb der Hallen auf das Inventar in den Hallen ist daher vernachlässigbar gering.

Das nach dem Aufprall in die Halle austretende Kerosin kann sich dann über die verfügbare Grundfläche der Halle verteilen. Effektiv steht durch die von den Behältern belegte Stellfläche nicht die gesamte Hallenfläche zur Ausbildung des Kerosin pools zur Verfügung. Sobald die vom Kerosin bedeckte Fläche groß genug ist, erfolgt der Abbrand mit einer nahezu konstanten Rate von etwa 4 mm/min (bei kleineren Flächen je nach Größe der Fläche 2 – 5 mm/min) [KUH 08].

Aus dem angenommenen Tankvolumen von 6,2 m<sup>3</sup> des Militärflugzeugs, der Annahme, dass 70 % des Kerosins zum Lachenbrand im LasmAaZ beitragen, einer angenommenen Fläche von 100 m<sup>2</sup> zur Ausbildung des Kerosin pools und einer niedrigen Abbrandrate von 0,002 m/min ergibt sich somit eine Brenndauer von

$$(0,70 \cdot 6,2 \text{ m}^3) / (100 \text{ m}^2 \cdot 0,002 \text{ m/min}) \approx 22 \text{ min.}$$

Bei geringeren Brandflächen vergrößert sich die Branddauer bei gleichzeitiger Verringerung der Anzahl der vom Brand betroffenen Gebinde. Bei größeren Flächen verringert sich die Branddauer, so dass die thermische Belastung der Gebinde ebenfalls verringert wird und somit nicht von thermisch bedingter Freisetzung ausgegangen werden muss. Für Container der Typen II – V liegt die Stellfläche eines Containers im Bereich von 2,7 m<sup>2</sup> – 6,4 m<sup>2</sup>, somit sind bei einer vom Brand betroffenen Fläche von 100 m<sup>2</sup> bis zu 37 am Boden stehende Container vom Brand betroffen. Mit der Annahme, dass gestapelte Container bis in die 4. Lage vom Brand thermisch betroffen sind, ergeben sich somit bis zu 150 vom Brand betroffene Container.

Für den Fall, dass Gussbehälter des Typs II vom Brand betroffen sind, ergibt sich aufgrund der kleineren Stellfläche von ca. 1,1 m<sup>2</sup> (Quadrat um zylindrischen Behälter mit Durchmesser 1,06 m) mit ca. 90 am Boden stehenden Behältern eine größere Anzahl thermisch betroffener Gebinde.

<sup>4</sup> ggf. abgesehen von einigen kleineren „Pfützen“

Wenn zusätzlich der Mindestabstand von 32 cm zwischen den Behältern berücksichtigt wird ergibt sich eine Fläche von 1,9 m<sup>2</sup> pro Behälter und eine Anzahl von ca. 53 Behältern auf 100 m<sup>2</sup>. Bei 4 Lagen ergibt sich somit eine Anzahl von 212 betroffenen Behältern. Aufgrund der deutlich geringeren Freisetzungsteile für aktivierte Metalle in den Gussbehältern gegenüber Mischabfällen in Containern der Typen II – V ist die Verwendung von 150 betroffenen Containern bei Betrachtung des Produkts aus Freisetzungsteil und betroffener Anzahl konservativ.

Somit werden für den Fall des Folgebrandes beim Absturz eines Militärflugzeuges abdeckend die Belastungsklassen BK 2 (nur thermische Belastung) und BK 8 (thermische und mechanische Belastung) nach [GRS 17] für eine Branddauer von 30 min und eine Flammentemperatur von 800°C angesetzt.

Durch den Brand ist die Freisetzung mit einer thermischen Überhöhung verbunden. Bei einem Kerosinvolumen von  $0,7 \cdot 6,2 \text{ m}^3 = 4,34 \text{ m}^3$ , einem Heizwert für Kerosin von ca. 43 MJ/kg und einer Dichte von 0,8 Mg/m<sup>3</sup> ergibt sich ein Energiegehalt von ca.  $1,5 \cdot 10^5 \text{ MJ}$  für das Kerosin im Lachenbrand. Bei einer Branddauer von ca. 22 min ergibt sich somit eine mittlere thermische Leistung von ca. 115 MW.

Unter der Annahme, dass durch Strahlungsverlust und die Erwärmung der Gebinde nur ca. 20 % der Energie für die thermische Überhöhung zur Verfügung stehen,<sup>5</sup> ergibt sich für diese ein Wärmestrom von ca. 20 MW. Für die Bestimmung der effektiven Emissionshöhe durch die thermische Überhöhung wird im Weiteren konservativ ein sehr niedriger Wert von 5 MW betrachtet (nur 25 % des Ausgangswertes). Der Grund hierfür liegt darin, dass bei bestehendem Gebäude die Freisetzung nur durch die relativ kleine konische Öffnung erfolgt, die durch das Flugzeug verursacht wurde. Somit liegt in diesem Fall zwar ein Quellbereich mit geringer Ausdehnung vor, allerdings kann nicht die gesamte Wärmeleistung zur Überhöhung beitragen. Für den Fall, dass das Gebäude soweit beschädigt wurde, sodass die gesamte Lache direkt zur Überhöhung beiträgt, müssen Korrekturen für die Überhöhung bei einem ausgedehnten Lachenbrand berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 2.2.5 und 4.1.1).

## **2.2. Ausbreitungsmodell**

In der SEWD-Berechnungsgrundlage [BMU 14] wird für Ausbreitungsberechnungen ein Lagrange'sches Partikelmodell gemäß Richtlinie VDI 3945, Blatt 3 [VDI 00] vorgegeben. Hierzu wird das frei verfügbare Modellsystem ARTM [RIC 15] empfohlen<sup>6</sup>. Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen können dabei sowohl über eine probabilistische Vorgehensweise als auch über ein in den meisten Anwendungsfällen deutlich konservativeres deterministisches Verfahren durchgeführt werden.

---

<sup>5</sup> Für einen schwarzen Strahler von der Ausdehnung des Kerosinpools ergibt sich bei einer Temperatur von 1200 K eine abgestrahlte Wärmeleistung von ca. 10 % der vom Brand verursachten thermischen Leistung. Zur Erwärmung von 300 Mg aus den betroffenen Gebinden um ca. 800 K wird eine Energiemenge von ca. 80 % des Energiegehalts des verbrennenden Kerosins benötigt. Somit stehen  $(1 - 0,1) \cdot (1 - 0,8) = 0,18 \approx 20 \%$  der Energie für die thermische Überhöhung zur Verfügung.

<sup>6</sup> Allerdings ist ARTM in der derzeit vorliegenden Form generell nur für Ausbreitungsberechnungen und auch für Dosisberechnungen bei Langzeitableitungen geeignet. Dosisberechnungen für unfallbedingte kurzzeitige Freisetzungen bedürfen der Verwendung weiterer Postprocessing-Software, die hier zur Anwendung kam.

### **2.2.1. Meteorologische Daten**

Für die probabilistische Vorgehensweise wird empfohlen, dass als „*meteorologische Eingabedaten ... vorzugsweise mehrjährige Zeitreihen*“ Verwendung finden sollen. Der Rückgriff auf meteorologische Statistiken wird allerdings nicht ausgeschlossen. Vierparametrische meteorologische Statistiken für Ausbreitungsberechnungen geben Häufigkeiten für die in Klassen zusammengefassten Messwerte

- Windrichtung,
- Windgeschwindigkeit,
- Niederschlagsintensität und
- Turbulenzcharakterisierung (meist als Ausbreitungsklasse)

an.

Insbesondere für kürzere Freisetzungsdauern ( $\leq 1$  h) und bei Betrachtungen im Umfeld von wenigen km um die Quelle können meteorologische Statistiken in nahezu gleicher Weise wie Zeitreihen für probabilistische Ausbreitungsberechnungen genutzt werden. Hierzu sind einige Besonderheiten bei den Berechnungen zu beachten (siehe Abschnitt 3.4).

### **2.2.2. 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  $v_g$ :

$$W = A_f \cdot v_g \quad (\text{G 2-5})$$

Der nuklidabhängige Washoutfaktor ergibt sich aus der über die vertikale Koordinate integrierten Konzentrationsverteilung und einem Proportionalitätsfaktor, dem Washoutkoeffizienten  $\Lambda$ . Dieser hängt von der Niederschlagsintensität  $I$  (in mm/h) ab und ergibt sich aus dem Washoutkoeffizient  $\Lambda_0$  bei der Niederschlagsintensität  $I_0 = 1$  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.

Die vom aerodynamisch äquivalenten Partikeldurchmesser (AED) der Aerosole abhängigen Depositionsgeschwindigkeiten  $v_d$ , Sedimentationsgeschwindigkeiten  $v_s$  und Washoutkoeffizienten  $\Lambda_0$  sind in Tabelle 2-8 aufgeführt.

Tabelle 2-8: Washoutkoeffizienten, Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten nach [BMU 14], basierend auf [BMU 07]

AED-Klasse	AED [ $\mu\text{m}$ ]	Depositions- geschwindigkeit $v_d$ [m/s]	Sedimentations- geschwindigkeit $v_s$ [m/s]	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ [1/s]
1	< 2,5	0,001	0,00	$1 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 – 10	0,01	0,00	$2 \cdot 10^{-4}$
3	10 – 50	0,05	0,04	$3 \cdot 10^{-4}$
4	> 50	0,20	0,15	$4 \cdot 10^{-4}$
zusammengefasste Größenklassen				
wie 2	< 10	0,01	0,00	$2 \cdot 10^{-4}$
U	> 10	0,07	0,06	$3 \cdot 10^{-4}$

### 2.2.3. Gebäudeeinfluss

In ARTM [RIC 15] kann ein Einfluss der Gebäude auf die Ausbreitung berücksichtigt werden, indem die Abmessungen und Lage der Gebäude angegeben werden. Dann werden von einem im Programmsystem ARTM enthaltenen Präprozessor für 36 Ausbreitungssektoren und alle vorhandenen Diffusionskategorien mit einem diagnostischen Modell divergenzfreie Windfelder berechnet, die in den eigentlichen Ausbreitungsberechnungen verwendet werden.

Bei der Anströmung von Gebäuden kommt es sowohl im Luv als auch im Lee (Gebäudenachlauf) zur verstärkten Ausbildung von Turbulenzen. Dadurch erfolgt eine gegenüber der ungestörten Strömung stärkere vertikale Vermischung von Luftkonzentrationen. Bei größeren Quellhöhen führt dies dazu, dass hohe bodennahe Konzentrationen näher am Quellort, als dies ohne Störung der Fall wäre, beobachtet werden und die Konzentrationsmaxima im gestörten Fall höher sind. Bei bodennahen Freisetzungen führt dagegen die im gestörten Fall stärkere Vermischung zu geringeren Konzentrationsmaxima.

Zusätzlich kommt es bei der Anströmung von Gebäuden auch zu Richtungsänderungen bezüglich der ungestörten horizontalen Strömung und zur Beeinflussung des Vertikalprofils der Windvektoren. Insbesondere kann sich dieser Effekt durch die Überlagerung des Störeinflusses mehrere Gebäude verstärken. Dadurch wird die Lage möglicher Konzentrations- und Depositionsmaxima verändert und es kann zu Veränderungen bei der horizontalen Vermischung kommen.

Der Einfluss von Gebäuden auf die Ausbreitung ist allerdings von der Reichweite stark begrenzt. Die lokal durch die Gebäude induzierten Turbulenzen und Richtungsänderungen werden durch die allgemeine, von der Ausbreitungssituation (meist durch die Ausbreitungsklasse beschrieben) abhängige Turbulenz abgebaut.

Im vorliegenden Fall (Entfernung des nächsten zu betrachtenden Aufpunkts mehr als 400 m) wirkt sich der Einfluss der Gebäude am Standort KKK nicht mehr signifikant aus. Dies wurde durch mehrere vergleichende ARTM-Berechnungen (jeweils mit und ohne Gebäude) unter Berücksichtigung verschiedener Windrichtungen und Ausbreitungssituationen geprüft. Hier spielt insbesondere eine Rolle, dass die für die Szenarien anzusetzenden Quellhöhen durch thermisch induzierte Überhöhung

beeinflusst sind. Für die bei den Expositionsrechnungen maßgeblichen vorlaufenden Ausbreitungsberechnungen wurde daher auf die Berücksichtigung des Gebäudeeinflusses verzichtet, was zu stabilen Programmläufen und erheblichen Rechenzeitverkürzungen führte.

#### **2.2.4. Geländeeinfluss**

Der Einfluss von Unebenheiten des Geländes kann in ARTM [RIC 15] durch Vorgabe eines digitalen Geländemodells berücksichtigt werden. Die Geländedaten müssen dabei den gesamten Rechenbereich abdecken. Wenn nur der Geländeeinfluss berücksichtigt wird und kein Gebäudeeinfluss vorliegt, werden von ARTM für 2 Anströmrichtungen (Süd und West) und alle vorhandenen Diffusionskategorien passende Windfelder berechnet, die in den eigentlichen Ausbreitungsberechnungen verwendet werden.

Im vorliegenden Fall wird ein frei zugängliches digitales Geländemodell (Gitterweite 200 m) verwendet [BKG 15].

#### **2.2.5. Quellüberhöhung**

Die SEWD-Berechnungsgrundlage sieht eine Berücksichtigung einer Quellüberhöhung durch thermische Einflüsse vor: *„Die effektive Quellhöhe auf Grund thermischer bzw. mechanischer Effekte ist gemäß Richtlinie VDI 3782, Blatt 3 [VDI 85] bzw. anderer die Freisetzungsrandbedingungen besser beschreibenden Modelle zu bestimmen.“*

In [VDI 85] wird zwischen „kalten Quellen“ (Wärmestrom < 1,4 MW) und „warmen Quellen“ (differenziert für Wärmeströme zwischen 1,4 bis 6 MW und > 6 MW) unterschieden. Die Berechnungsformeln aus [VDI 85] für „warme Quellen“ wurden in [SSK 03] übernommen.

Für die Freisetzung bei dem auslegungsüberschreitenden Ereignis des Absturzes eines Flugzeugs mit Eintrag großer Treibstoffmengen und Folgebrand ist ein Kerosinbrand mit erheblicher Wärmeleistung zu erwarten. Daher ist neben der thermischen Belastung der Gebinde auch mit einer thermischen Quellüberhöhung zu rechnen.

Prinzipiell sieht die SEWD-Berechnungsgrundlage die Anwendung der Gleichungen aus [VDI 85] zur Bestimmung der effektiven Quellhöhe vor. ARTM setzt die Berechnungsformeln aus [VDI 85] um. Da in [VDI 85] jedoch von nur wenig ausgedehnten Quellen, wie z. B. Kaminöffnungen, ausgegangen wird, sollte für horizontal ausgedehnte Quellen eine Korrektur dieser Überhöhungsrechnung verwendet werden. Für die Software HotSpot [HOM 13] wird zur Bestimmung der Überhöhung der Formalismus nach Briggs ([BRI 69], [BRI 71], [BRI 75]) verwendet, der auch [VDI 85] mit zugrunde liegt. Für die Berechnung der Überhöhung eines Brandes in einem Kerosinpool wird in [HOM 13] jedoch eine zusätzliche Korrektur der effektiven Emissionshöhe verwendet. Hier wird aus der vorher bestimmten effektiven Höhe  $H$ , die für eine Quelle geringer Ausdehnung berechnet wurde, eine korrigierte Höhe  $H_{\text{kor}}r$  abgeleitet.

$$H_{\text{kor}}r = \left( H^3 + \left( \frac{R}{0,6} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{R}{0,6} \quad (\text{G 2-7})$$

Dabei bezeichnet  $R$  den Durchmesser des Kerosinpools. Da diese Gleichung nicht direkt in ARTM verwendet werden kann, wird in Abschnitt 4.1.1 (mit Bezug auf Abschnitt 2.1.2.2) ein Wärmefluss

bestimmt, der abdeckend niedrig ist, so dass die aus den Formeln nach [VDI 85] bestimmte effektive Emissionshöhe unterhalb der korrigierten Höhe  $H_{\text{kor}}$  liegt.

### **2.2.6. Gauß-Fahnenmodell für die Dosis an der Staatsgrenze**

Zur Abschätzung der Dosis an der Grenze des deutschen Staatsgebiets wurde das Gauß-Fahnenmodell zugrunde gelegt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da die Entfernungen zur Grenze des Staatsgebiets mehr als 100 km betragen und daher in ARTM ein Gitter mit einer Ausdehnung von mehr als  $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$  gewählt werden müsste. Dabei werden die Berechnungen sehr zeitintensiv und durch die notwendige Gitterweite ergeben sich große mittelungsbedingte Unsicherheiten. Daher ist in diesem Fall das Gauß-Fahnenmodell mit oberer Mischungsschichtbegrenzung als Näherung als gleichwertig anzusehen. Die Berücksichtigung einer während der gesamten Nuklid Ausbreitung konstanten Wetterlage ist konservativ. 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.

In [VDI 09] wird ein Gauß-Fahnenmodell beschrieben, das nahezu identisch mit dem in [SSK 03] beschriebenen Modell ist. Insbesondere werden die gleichen horizontalen und vertikalen Ausbreitungsparameter verwendet. Es wird in [VDI 09] darauf hingewiesen, dass diese Ausbreitungsparameter aus Experimenten für Quellentfernungen bis 10 km ermittelt wurden. Weiterhin wird in [VDI 09] festgestellt, dass die horizontalen Ausbreitungsparameter ( $\sigma_y$ ) näherungsweise auch bis 100 km Entfernung gelten. Bei Entfernungen ab 30 km ist der Einfluss der vertikalen Ausbreitungsparameter ( $\sigma_z$ ) auf die Fahnenausweitung durch die gemäß [VDI 09] anzuwendende Mischungsschichthöhenbegrenzung gering. In [SSK 03] erfolgt keine Begrenzung der Mischungsschichthöhe, sondern eine Begrenzung der Werte der vertikalen Ausbreitungsparameter ( $\sigma_z$ ). Für große Quellentfernungen führen beide Berechnungsvarianten daher ggf. zu unterschiedlichen Ergebnissen. Weiterhin wird in [VDI 09] darauf hingewiesen, dass bei Verwendung stationärer ortsunabhängiger meteorologischer Parameter die berechneten Immissionskonzentrationen als Näherungswerte zu betrachten sind. Außerdem wird in [VDI 09] darauf verwiesen, dass der Einfluss nasser Depositionen auf die Abreicherung in diesen Entfernungsbereichen zunimmt. Eine Nichtberücksichtigung dieser Abreicherung vergrößert daher die Konservativität. Daher wird die potentielle Dosis an der Grenze des deutschen Staatsgebiets mit dem Gauß-Fahnenmodell nach [SSK 03] abgeschätzt.

Die Berechnung der Ausbreitungs- und Ablagerungsfaktoren und der Dosiswerte erfolgt in einem polaren Koordinatensystem mit einer Unterteilung in 12 Sektoren von jeweils  $30^\circ$  Breite, dessen Ursprung am Fußpunkt des Emissionsortes liegt. Die Sektoren werden im Uhrzeigersinn nummeriert, beginnend bei 1 für den Sektor  $345^\circ$  bis  $15^\circ$  (Nord). Die Ausbreitungsrichtungen entsprechen dabei den Windrichtungen um  $180^\circ$  versetzt.

Das in [SSK 03] in den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.4 angegebene Verfahren zur Durchführung der Ausbreitungsberechnung basiert nicht auf für den Standort charakteristischen meteorologischen Daten, sondern legt Parameter fest, bei deren Anwendung in den Ausbreitungsberechnungen abdeckende Expositionen ermittelt werden.

Es werden ohne Berücksichtigung der Windrichtung die Ausbreitungsrechnungen für die sechs Wettersituationen

- Ausbreitungsklasse A (ohne Niederschlag),
- Ausbreitungsklasse B (ohne Niederschlag),
- Ausbreitungsklasse C (5 mm/h Niederschlag),
- Ausbreitungsklasse D (5 mm/h Niederschlag),
- Ausbreitungsklasse E (5 mm/h Niederschlag) und
- Ausbreitungsklasse F (ohne Niederschlag)

bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s in 10 m über Grund<sup>7</sup> durchgeführt. Bei Freisetzungzeiten von mehr als 8 Stunden werden Einschränkungen hinsichtlich der zu berücksichtigenden Ausbreitungsklassen getroffen. Es wird die Diffusionskategorie ausgewählt, die zur höchsten Gesamtexposition führt.

### **2.3. Dosisberechnung**

In den folgenden Abschnitten werden die in dieser Untersuchung berücksichtigten Expositionspfade (Abschnitt 2.3.1) und die angenommenen Lebensgewohnheiten (Abschnitt 2.3.2), wie sie in [BMU 14] (basierend auf [SSK 03]) festgelegt sind, soweit sie für die weitere Berechnung von belang sind, wiedergegeben. Weiterhin werden die zu berücksichtigenden Dosiskoeffizienten (Abschnitt 2.3.3) erläutert und der Bewertungsmaßstab für die Ergebnisse der Dosisberechnungen (Abschnitt 2.4) angegeben.

Zur Berechnung der Exposition werden Referenzpersonen aus sechs Altersgruppen gemäß Anlage 11 Teil B 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).

#### **2.3.1. Expositionspfade**

In [BMU 14] werden die Expositionspfade gemäß [SSK 03] mit Ausnahme des Ingestionspfads berücksichtigt. Hier wird davon ausgegangen, dass man die Lebensmittel, die im Umfeld des Ereignisorts angebaut werden, messtechnisch überwacht und bei gegebener Kontamination den Verzehr kurzfristig und wirksam unterbinden kann. Es sind demnach die Pfade

- äußere Strahlenexposition durch  $\beta$ -Strahlung innerhalb der Abluftfahne ( $\beta$ -Submersion),

---

<sup>7</sup> Aus diesen Angaben ist die Windgeschwindigkeit in Ausbreitungshöhe entsprechend [SSK 03] Anhang 2 zu berechnen. Wenn gleichzeitig mit der Emission radioaktiver Stoffe auch größere Wärmemengen emittiert werden, ist zur Berechnung der effektiven Emissionshöhe das in [SSK 03] Anhang 8 beschriebene Verfahren anzuwenden. Dabei ist die für die Exposition ungünstigste Windgeschwindigkeit anzuwenden. Diese kann von der in [SSK 03] Anhang 2 angegebenen Windgeschwindigkeit nach oben abweichen.

- äußere Strahlenexposition durch  $\gamma$ -Strahlung aus der Abluftfahne ( $\gamma$ -Submersion),
- äußere Strahlenexposition durch  $\gamma$ -Strahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe ( $\gamma$ -Bodenstrahlung) und
- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)

zu berücksichtigen.

### **2.3.2. Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen**

#### **2.3.2.1. Atemraten**

Gemäß [BMU 14] sind die Atemraten nach [SSK 03], Anhang 1, Tabelle 3 für das Emissionszeitintervall 0 – 8 Stunden zur Berechnung der Inhalationsdosis verwenden. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 2-9 aufgeführt.

Tabelle 2-9: Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [BMU 14] (basierend auf [SSK 03] für das Emissionszeitintervall 0 – 8 Stunden)

Altersgruppe	$\leq 1$ a	$> 1 - \leq 2$ a	$> 2 - \leq 7$ a	$> 7 - \leq 12$ a	$> 12 - \leq 17$ a	$> 17$ a
Atemrate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] Zeitintervall 0 bis 8 h	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Die Lungenretentionsklassen von Aerosolen werden so gewählt, dass sich der höchste Beitrag zur Inhalationsdosis ergibt.

#### **2.3.2.2. Expositionszeiten bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen**

Bei der Ermittlung der Exposition durch Bodenstrahlung werden verschiedene Aufenthaltszeiten betrachtet. Diese entsprechen dabei den Betrachtungszeiträumen zur Beurteilung der Notwendigkeit von Katastrophenschutzmaßnahmen (siehe Abschnitt 2.4.1, Tabelle 2-11).

Es wird analog zum Vorgehen beim Auslegungsstörfall die potentielle Dosis durch äußere Bestrahlung und Inhalation für eine Person, die sich während des gesamten Durchzugs der Abluftfahne und der betrachteten Dauer der Einwirkung der Bodenstrahlung ungeschützt<sup>8</sup> im Freien aufhält, ermittelt. Bei Wohnbebauungen ist dabei von Daueraufenthalt auszugehen.

Als Zeitmaßstab für die Beurteilung der Notwendigkeit kurzfristiger Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Evakuierung) werden 7 Tage verwendet. Für längerfristig angelegte Maßnahmen ist der Betrachtungszeitraum auf 1 Monat (temporäre Umsiedlung) bzw. 1 Jahr (dauerhafte Umsiedlung) festgelegt. Auf die Betrachtung des 1-Monat-Zeitraums wird im vorliegenden Bericht verzichtet. Auf die Einhaltung entsprechender Dosisrichtwerte kann im vorliegenden Fall auch durch die kombinierte Bewertung 7-Tage- und 1-Jahr-Folgedosis geschlussfolgert werden.

<sup>8</sup> Schutzwirkungen durch Aufenthalt in Gebäuden sollen hier nicht betrachtet werden, um die Anwendbarkeit der Bewertungsmaßstäbe zu gewährleisten.

Für das in diesem Bericht betrachtete auslegungsüberschreitende Ereignis werden daher nur die radiologischen Modellierungen und ein Vergleich mit den entsprechenden Eingreifrichtwerten der Tabelle 2-11 für die 7-Tage- und 1-Jahr-Folgedosis durchgeführt.

Weiterhin wird bei der Bestimmung der Aufenthaltszeit zwischen Wohnbebauung und Arbeitsstätten unterschieden. Für den Aufenthalt in einer Wohnbebauung wird von einer Aufenthaltszeit von 24 Stunden pro Tag, 7 Tagen pro Woche und 365 Tagen pro Jahr ausgegangen. Für den Aufenthalt an der Arbeitsstätte werden 8 Stunden pro Arbeitstag, 5 Arbeitstage pro Woche und 250 Arbeitstage pro Jahr unterstellt. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 2-10 zusammengefasst.

Tabelle 2-10: Unterstellte Aufenthaltszeiten für Bereiche mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten

Betrachtungszeitraum	Aufenthaltsdauer [h]	
	Wohnbebauung	Arbeitsstätte
7 Tage	168	40
1 Jahr	8760	2000

Konservativ werden für den Aufenthalt an der Arbeitsstätte alle Altersgruppen betrachtet. Damit wird auch berücksichtigt, dass in der Nähe von Arbeitsstätten eventuell eine Kindertagesstätte oder Schule vorhanden ist.

### **2.3.3. Dosiskoeffizienten**

Zur Berechnung der Strahlenexpositionen über die in Abschnitt 2.3.1 angegebenen Expositionspfade werden Dosiskoeffizienten für

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

benötigt. Die Strahlenschutzverordnung [SSV 18] verweist für die Dosiskoeffizienten auf [BMU 01]. Die dort enthaltenen Dosiskoeffizienten werden für die Dosisberechnungen der vorliegenden Untersuchung angewendet.

## **2.4. Bewertungsmaßstab für auslegungsüberschreitende Ereignisse**

### **2.4.1. Eingreifrichtwerte für die Dosis**

Auslegungsüberschreitende Ereignisse fallen im Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) unter den Begriff der „Notfalls“. 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 ergriffenen Maßnahmen bewältigt werden kann.“*

Gemäß § 93 Abs. 1 StrlSchG gilt: *„Für den Schutz der Bevölkerung gilt bei der Planung von Schutzmaßnahmen und bei den Entscheidungen über ihre Durchführung in einem Notfall ein Referenzwert von 100 Millisievert für die effektive Dosis, die betroffene Personen jeweils durch den Notfall innerhalb eines Jahres über alle Expositionspfade erhalten würden, wenn die vorgesehenen Schutzmaßnahmen durchgeführt würden. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit wird ermächtigt, durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates Verfahren und Annahmen zur Abschätzung, inwieweit dieser Referenzwert unterschritten, eingehalten oder überschritten wird, festzulegen.“*

Weitergehende Verordnungen sollen noch festgelegt werden, existieren zum aktuellen Zeitpunkt allerdings noch nicht.

Weitere Beurteilungskriterien bezüglich der 7-Tage-Folgedosis bieten die SSK-Empfehlungen [SSK 14] und [SSK 15].

Expositionspfade werden gemäß [SSK 03] berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.3.1), mit Ausnahme des Ingestionspfads. Hier wird davon ausgegangen, dass man die Lebensmittel, die im Umfeld des Ereignisorts angebaut werden, messtechnisch überwacht und bei gegebener Kontamination den Verzehr kurzfristig und wirksam unterbinden kann.

Bei der Ermittlung der Exposition durch Bodenstrahlung werden verschiedene Aufenthaltszeiten betrachtet. Als Zeitmaßstab für die Beurteilung der Notwendigkeit kurzfristiger Maßnahmen werden 7 Tage verwendet.

Für längerfristig angelegte Maßnahmen ist der Betrachtungszeitraum auf 1 Jahr (z. B. dauerhafte Umsiedlung) festgelegt. Bei langfristig angelegten Maßnahmen ist allerdings zu berücksichtigen, dass solche nur anhand realer Situationen (Messwerte der Ortsdosisleistung) entschieden werden können, da die bei den Berechnungen zugrunde liegenden Methoden mit erheblichen Konservativitäten behaftet sind.

Die Betrachtungszeiträume und Eingreifrichtwerte<sup>9</sup> gemäß [SSG 17], [SSK 14] und [SSK 15] sind in Tabelle 2-11 zusammengefasst.

---

<sup>9</sup> Auf die Berücksichtigung von Eingreifrichtwerten für die durch Inhalation von Iod-Isotopen verursachte Schilddrüsensendosis kann hier verzichtet werden, zur 1-Monat-Folgedosis siehe Abschnitt 2.3.2.2.

Tabelle 2-11: Eingreifrichtwerte bezüglich effektiver Dosis für bestimmte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationszeiten und Expositionspfade nach [SSG 17], [SSK 14] und [SSK 15]

Maßnahme	Effektive Dosis	Integrationszeit und Pfade
Aufenthalt in Gebäuden	10 mSv	äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch Inhalation
Evakuierung	100 mSv	äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch Inhalation
Langfristige Umsiedlung	100 mSv	äußere Exposition in 1 Jahr durch abgelagerte Radionuklide

Tatsächliche Eingreifwerte können über den Eingreifrichtwerten aus Tabelle 2-11 liegen, wenn die Durchführung der Maßnahmen mit großen Nachteilen verbunden ist oder wenn dadurch nur ein kleiner Teil der Strahlendosis vermieden werden kann. Eingreifwerte unter den Eingreifrichtwerten aus Tabelle 2-11 sind aus Strahlenschutzgründen alleine nicht gerechtfertigt.

#### **2.4.2. Ungünstigste Aufpunkte**

Als ungünstigste Aufpunkte für die Bewertung von Eingreifrichtwerten des Katastrophenschutzes sind diejenigen Punkte anzusehen, an denen solche Maßnahmen tatsächlich zum Tragen kommen könnten, also Orte mit Bebauungen, die gewerblich oder zu Wohnzwecken genutzt werden.

Bei der probabilistischen Analyse werden standortbezogene meteorologische Daten verwendet und es werden die ungünstigsten Aufpunkte in Abhängigkeit vom Ausbreitungssektor betrachtet. Dazu werden Bereiche mit Wohnbebauung bzw. Arbeitsstätten auf Basis der Auswertung von Kartenmaterial ausgewählt und Werte für die potentielle Exposition beim Aufenthalt in diesen Bereichen berechnet. Aus den maximalen Dosiswerten für jede Ausbreitungssituation wird dann der Wert für die potentielle Dosis bestimmt, unter dem 95 % der maximalen Dosiswerte liegen, der also von nur 5 % der Werte übertroffen wird. Eine genauere Beschreibung der Methodik findet sich in Abschnitt 3.4.

### **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 (siehe Abbildung 3-1). 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

Abbildung 3-2 zeigt ein Luftbild des KKK-Geländes mit Sektoreinteilung, deren Ursprung auf das geplante LasmAaZ bezogen ist. Die in Abbildung 3-2 eingezeichnete blaue Linie kennzeichnet die Grenze des Betriebsgeländes. Zusätzlich sind die im dargestellten Bereich liegenden Aufpunkte der nächstgelegenen Wohnbebauung in Rot mit Angabe der Entfernung zum LasmAaZ dargestellt.

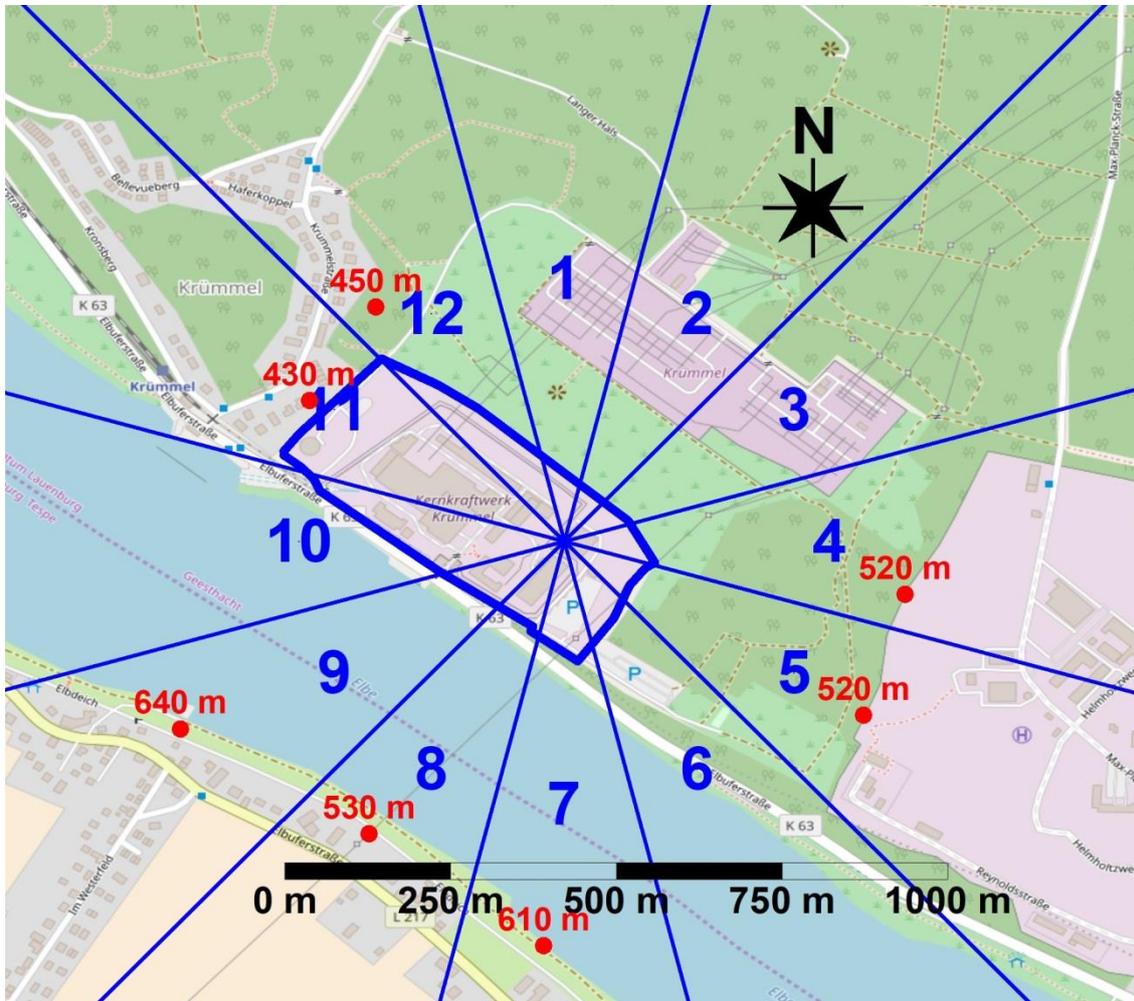


Abbildung 3-2: KKK-Betriebsgelände (blau) und auf das geplante LasmAaZ bezogener Sektoreinteilung (Karte erstellt auf Basis von OpenStreetMap Kartenmaterial, [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org), © OpenStreetMap-Mitwirkende)

Der Geländeeinfluss im Ausbreitungsmodell wird über ein digitales Geländemodell berücksichtigt<sup>10</sup> [BKG 15].

Abbildung 3-3 zeigt einen Ausschnitt des KKK-Geländes und die geplante Lage des LasmAaZ auf dem Gelände. Das LasmAaZ soll unmittelbar nordöstlich des bestehenden SZK am bzw. im Geesthang errichtet werden. Dadurch wird ein Teil des LasmAaZ unterirdisch sein (siehe Abbildung 3-4).

<sup>10</sup> Dies ist für die hier durchgeführten Berechnungen sinnvoll, da reale Aufpunkte in Entfernungen von mehreren km und in verschiedenen Richtungen betrachtet werden. Für Berechnungen, die sich dagegen auf das unmittelbare Umfeld der Anlage (Entfernungen im Bereich von ca. 1 km, Betrachtung von abstrakten ungünstigsten Aufpunkten) beziehen, kann der Einfluss des Geländes dagegen auf andere Weise (z. B. reduzierte Emissionshöhe) berücksichtigt werden.

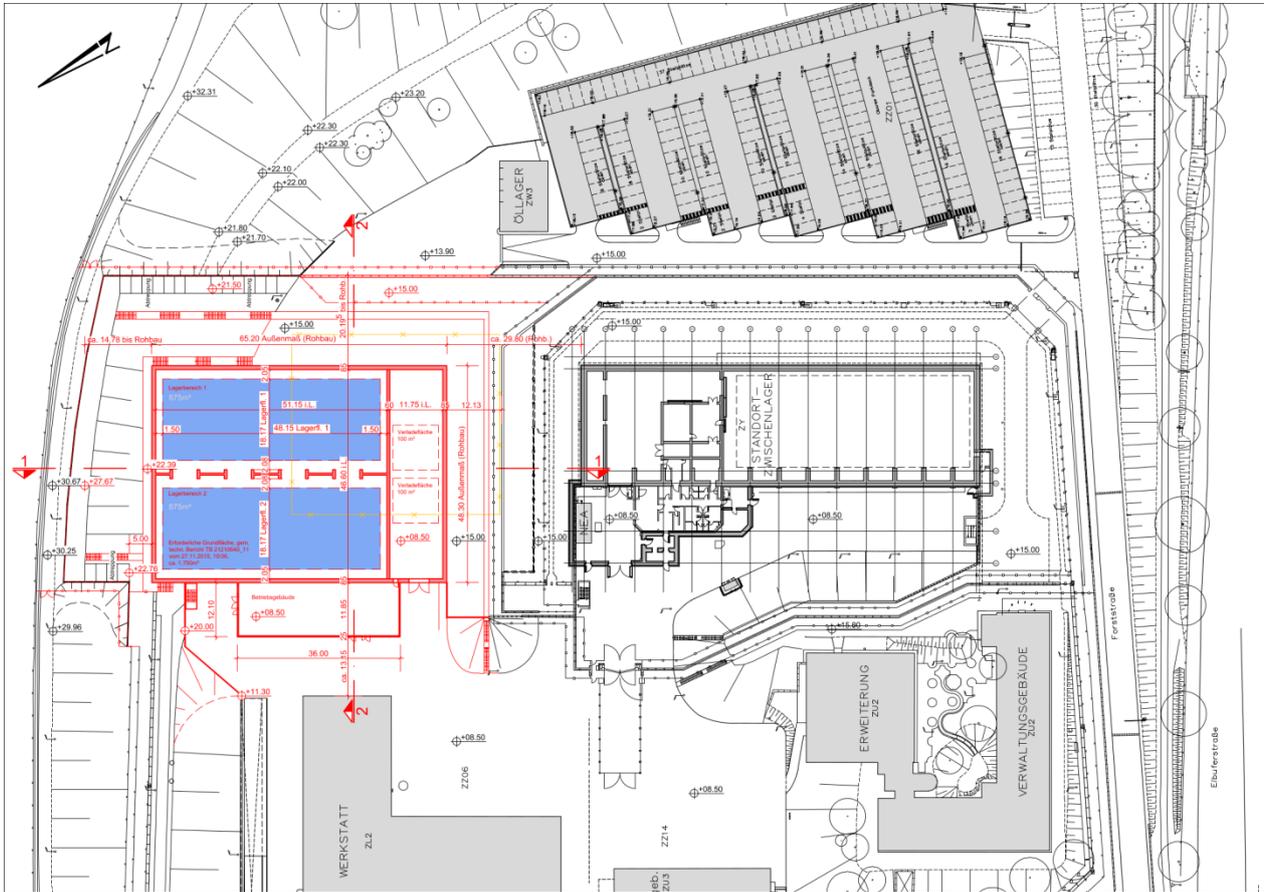


Abbildung 3-3: Ausschnitt des KKK-Geländes mit Lage des geplanten LasmAaZ [ESP 16]

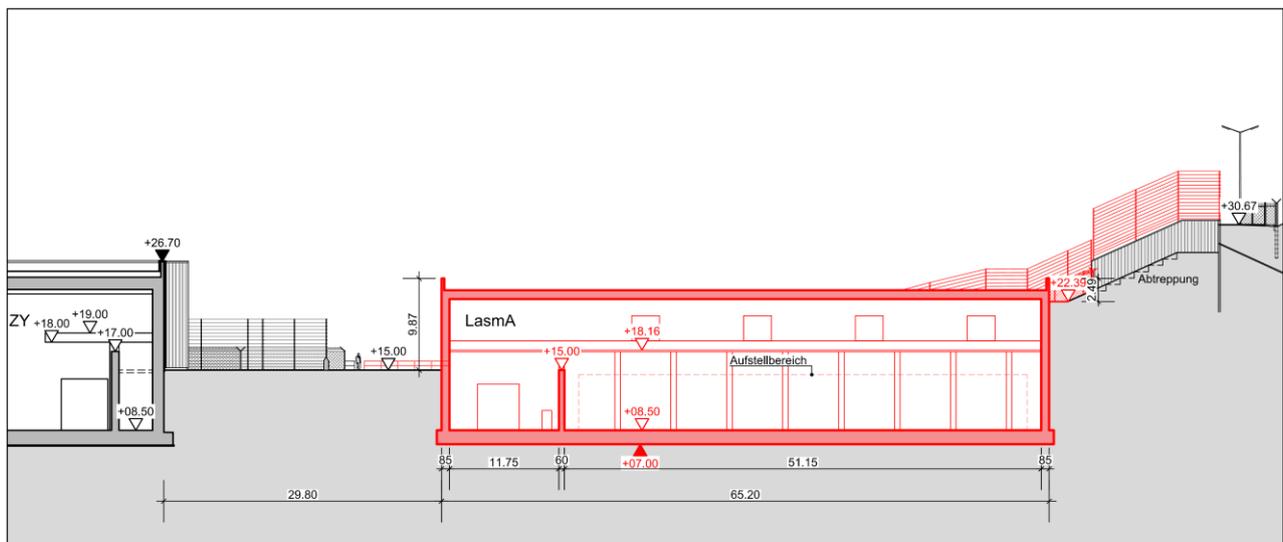
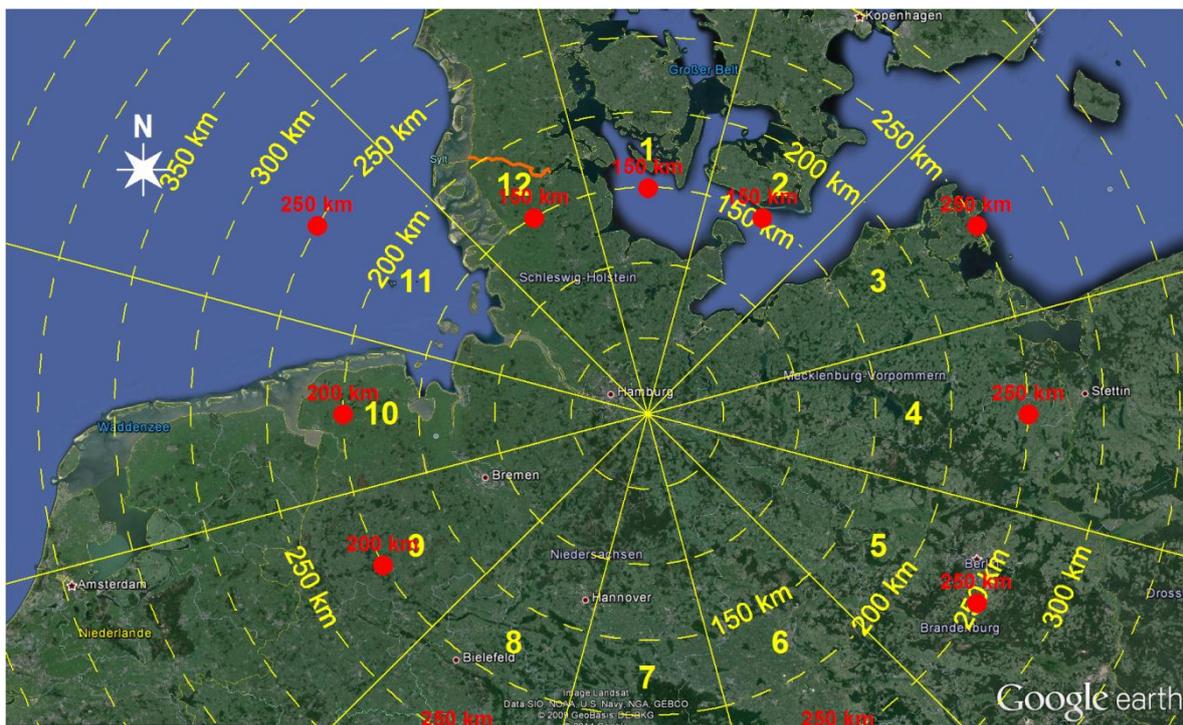


Abbildung 3-4: Schnittdarstellung des geplanten LasmAaZ [ESP 16]

In Abbildung 3-5 ist die Lage des LasmAaZ relativ zur Grenze des Staatsgebiets gezeigt. Zusätzlich zur auf das LasmAaZ bezogenen Sektoreinteilung sind radiale Entfernungen zum LasmAaZ in km angegeben. Mit Dänemark befindet sich das am nächsten liegende Land in Sektor 1 mit einer Entfernung von etwas mehr als 150 km. Der Grenzverlauf mit Dänemark auf dem Festland ist in Abbildung 3-5 orange markiert.



**Abbildung 3-5:** Lage des LasmAaZ im Bezug zu den Grenzen des deutschen Staatsgebiets mit Sektoreinteilung und Angabe der Entfernungen in km (erstellt auf Basis von Google Earth™ Pro Kartenservice Material)

### **3.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigste Aufpunkte**

Da sich für die im vorliegenden Fall zu betrachtenden Entfernungen von mehr als 400 m der Einfluss der Gebäude nicht mehr signifikant auswirkt (siehe Abschnitt 2.2.3), wird auf eine Modellierung der Gebäude verzichtet. Da der Fall eines Folgebrandes betrachtet wird, wird eine thermische Überhöhung berücksichtigt.

Die probabilistischen Ausbreitungsrechnungen werden unter Verwendung meteorologischer Daten vom Standort durchgeführt. Somit muss bei diesen Berechnungen eine Richtungsabhängigkeit der Entfernung zur nächstgelegenen Wohnbebauung bzw. Arbeitsstätte berücksichtigt werden. Die Orte mit Wohnbebauung bzw. Arbeitsstätten werden dabei nicht als einzelne Aufpunkte definiert, sondern jeweils über einen Polygonzug als über die jeweilige Wohnbebauung bzw. Arbeitsstätte ausgedehnter Bereich.

Da eine thermische Überhöhung berücksichtigt wird, ist nicht unbedingt davon auszugehen, dass sich die höchste Dosis an der nächstgelegenen Wohnbebauung oder Arbeitsstätte ergibt. Daher wird für jede Richtung nicht nur ein Bereich für die nächstgelegene Wohnbebauung bzw. Arbeitsstätte definiert, sondern ab diesem zusätzlich auch Bereiche für alle weiter entfernt liegenden Wohnbebauungen bzw. Arbeitsstätten. Um nicht zu viele Bereiche definieren zu müssen, wird für große Entfernungen dann ein Polygonzug festgelegt, außerhalb dessen alle Positionen im Rengitter berücksichtigt werden.

Die Bereiche für Wohnbebauung sind in Abbildung 3-6 rot schraffiert und die Bereiche, in denen nur Arbeitsstätten vorhanden sind, sind grün schraffiert dargestellt.

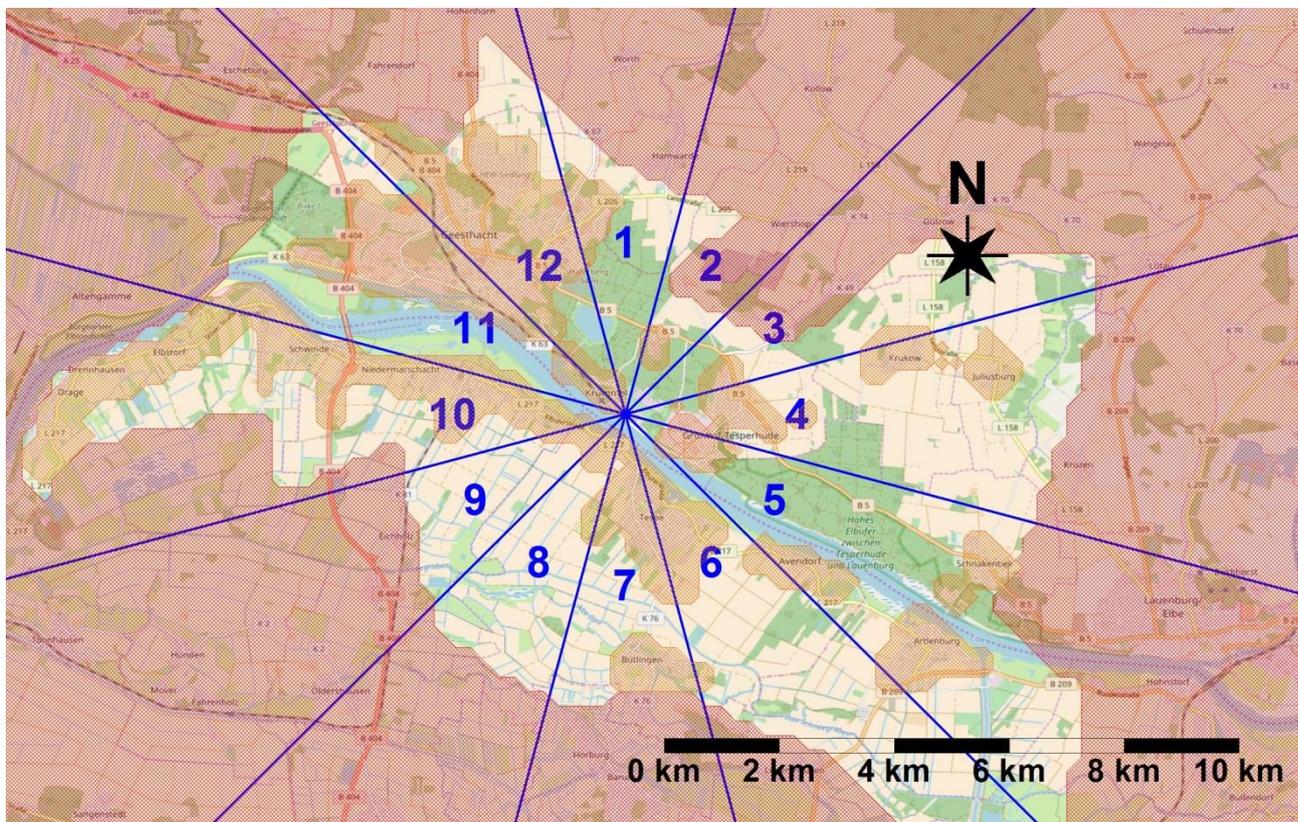


Abbildung 3-6: Karte der Umgebung (erstellt auf Basis von OpenStreetMap Kartenmaterial, [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org), © OpenStreetMap-Mitwirkende) mit betrachteten Bereichen für Wohnbebauung (rote Schraffur) und Arbeitsstätten (grüne und rote Schraffur) sowie Sektoreinteilung

Der Außenbereich ist rot schraffiert dargestellt, da dieser bei der Berechnung der Dosis unabhängig von einer tatsächlichen Nutzung als Wohnbebauung verwendet wird. Bei der Berechnung der resultierenden potentiellen Dosis für die Arbeitsstätten wurden sämtliche Bereiche berücksichtigt, also auch die Bereiche für Wohnbebauung.

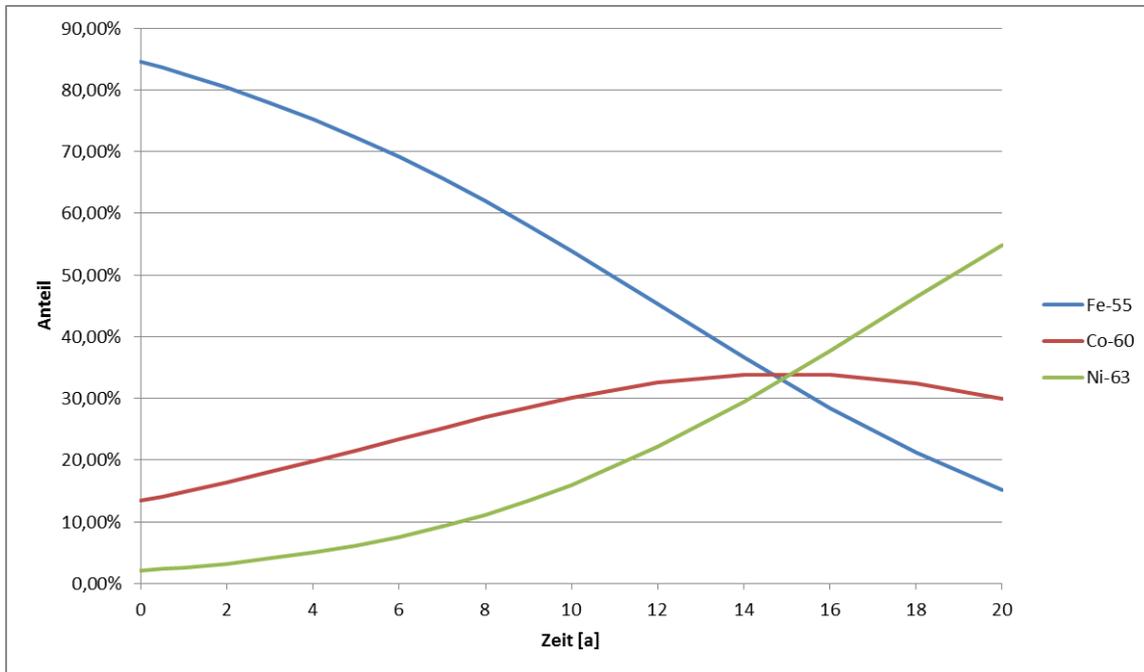
Die nächstgelegene Wohnbebauung befindet sich in ca. 400 m Entfernung vom LasmAaZ in nord-westlicher Richtung (Sektor 11 und 12) in der Ortschaft Krümmel.

### **3.3. Aktivitätsinventar**

In den folgenden Abschnitten werden die bei den Berechnungen verwendeten Nuklidvektoren sowie das angesetzte Aktivitätsinventar beschrieben. Dabei werden nur die bei einem Störfall radiologisch relevanten Nuklide berücksichtigt. Die Nuklide H-3 und C-14 werden im Folgenden 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.

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

Für den Nuklidvektor wird eine Zusammensetzung aus den typischen Aktivierungsprodukten Co-60, Fe-55 und Ni-63 verwendet. Wenige Monate nach dem Abschalten ergeben sich dabei relative Zusammensetzungen von ca. 85 % Fe-55, 13 % Co-60 und 2 % Ni-63 (normiert auf die Summe der Aktivitäten dieser drei Radionuklide; beispielsweise aus [GRS 11]). Aufgrund der relativ kurzen Halbwertszeit von Fe-55 (2,7 a) ergibt sich innerhalb kurzer Zeiträume eine starke Verschiebung der relativen Beiträge dieser Nuklide an der Gesamtaktivität. Daher wurde über eine Zerfallskorrektur die relative Zusammensetzung der Aktivität aus diesen drei Nukliden bestimmt. Der Zeitverlauf der daraus resultierenden Anteile sind in Abbildung 3-7 grafisch dargestellt.



**Abbildung 3-7:** Zeitverlauf der relativen Anteile der durch Aktivierung entstehenden Nuklide Fe-55, Co-60 und Ni-63 an der durch diese Nuklide resultierenden Gesamtaktivität, als Funktion der Zeit

Da Fe-55 und Ni-63 radiologisch weit weniger relevant sind als Co-60, wird der Zeitpunkt ausgewählt, an dem Co-60 den höchsten relativen Anteil an der Aktivität verursacht und die Nuklidzusammensetzung zu diesem Zeitpunkt als abdeckender Nuklidvektor für Aktivierungsprodukte verwendet. Dabei tragen alle drei Nuklide ungefähr mit gleichen Anteilen bei, der entsprechende Nuklidvektor ist in Tabelle 3-1 aufgeführt.

**Tabelle 3-1:** Nuklidvektor A für Aktivierung

Nuklid	Nuklidvektor für Aktivierung
Co-60	33,4 %
Ni-63	33,3 %
Fe-55	33,3 %

### 3.3.2. Nuklidvektor für 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. 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. Gemäß der vorliegenden Daten zum nuklidspezifischen Inventar der in der Transportbereitstellungshalle (TBH2 des KKB) vorhandenen KKK-Gebinden wird ein typisches Verhältnis von  $A_{Sr-90}/A_{Cs-137} = 2,5/100$  angesetzt. Weiterhin wird stellvertretend für alle

Kernbrennstoffe<sup>11</sup> ( $\alpha$ -Strahler) Am-241 mit einem Gesamtanteil von 1 % in der Kontamination 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 K für Kontaminationen in Gebinden, die im LasmAaZ eingelagert werden sollen.

Tabelle 3-2: Nuklidvektor K für Kontamination

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

### 3.3.3. Berücksichtigte Aktivitäten

Die im LasmAaZ insgesamt einzulagernde Aktivität soll gemäß [KKK 16]  $2 \cdot 10^{17}$  Bq betragen.

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] (exemplarisch)

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 maximal in einzelnen Gebinden vorhandene Aktivitätsinventar aus den Annahmebedin-

<sup>11</sup> Aus der Betriebshistorie des KKK liegen keine Erkenntnisse vor, die eine signifikante  $\alpha$ -Kontamination erwarten lassen. Die Annahme von 1 % Am-241 erfolgt konservativ.

gungen für das Endlager Konrad abgeleitet. Für die hier relevanten Nuklide sind die entsprechenden Maximalwerte der Aktivitäten in Tabelle 3-4 zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Aktivitätsgrenzwerte für die hier relevanten Nuklide nach [BFS 14] in Abhängigkeit der Abfallbehälterklasse (ABK) und der Abfallproduktgruppe (APG). Dabei ist zusätzlich die Summenformel einzuhalten.

ABK	APG	maximal zulässige Einzelaktivität [Bq]					
		Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
I	01	$5,0 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$5,1 \cdot 10^9$	$8,6 \cdot 10^8$	$7,6 \cdot 10^8$
I	02	$1,7 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$4,9 \cdot 10^{14}$	$1,9 \cdot 10^{11}$	$3,0 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{10}$
I	03	$6,1 \cdot 10^{11}$	$8,7 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	$6,4 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$9,3 \cdot 10^{10}$
I	04	$1,6 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{14}$	$4,3 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$
I	05	$5,0 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{12}$	$8,6 \cdot 10^{11}$	$7,6 \cdot 10^{11}$
I	06	$5,0 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{14}$	$1,4 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{12}$	$8,6 \cdot 10^{11}$	$7,6 \cdot 10^{11}$
II	01 – 06	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{16}$	$3,4 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{13}$

Mit den in Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 angegebenen Daten ergeben sich unter Verwendung der Summenformel die in Tabelle 3-5 aufgeführten einzuhaltenden Maximalaktivitäten. Mit angegeben ist die Einordnung in Abfallgebindegruppen (AGG). Dabei wird für Gussbehälter AGG 8 verwendet (siehe auch Tabelle 2-2). Wenn unterschiedliche Abfalltypen in den anderen Gebindetypen möglich sind, wird konservativ die AGG verwendet, die zu den höchsten Freisetzunganteilen führt. Für aktivierte Metalle wird für die Zuordnung der Freisetzunganteile der Gebindetyp für den als Kontamination vorliegenden Anteil der Aktivität verwendet. Für die als Aktivierung vorliegende Aktivität wird von keiner Freisetzung ausgegangen.

Es wird davon ausgegangen, dass der Hauptanteil der Aktivität in Form aktivierter Metalle vorliegt und dass zusätzlich bei aktivierten Metallen in Behältern des Typs II (mit ABK II und APG 03) ein Anteil von 1 % der Gesamtaktivität im Gebinde in Form von Kontamination vorliegt. Für aktivierte Metalle in KC II (ABK I und APG 03) wird davon ausgegangen, dass ein Anteil von 10 % der Gesamtaktivität<sup>12</sup> im Gebinde in Form von Kontamination vorliegt. Um die Gesamtaktivität von  $2 \cdot 10^{17}$  Bq für das LasmAaZ auch zu erreichen, wurde für die Behälter mit den höchsten Aktivitäten (Typ II mit APG 03) eine zweifache Überladung unterstellt.

<sup>12</sup> Die Gesamtaktivität, die in diesen Gebinden erlaubt ist, ist niedriger als die im Gussbehälter Typ II (ABK II). Geht man aber davon aus, dass das Verhältnis von Aktivierungsaktivität und Kontaminationsaktivität durch das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche des Abfalls bestimmt wird, ist der Anteil der Kontamination hier höher anzusetzen als für Gussbehälter.

**Tabelle 3-5:** Maximal zulässige Einzelaktivitäten in den Gebindetypen sowie Zuordnung von APG bzw. Abfalltyp. Die angegebenen AGG wurden gemäß Tabelle 2-2 zugeordnet. Die Aktivitäten ergeben sich aus der Berücksichtigung der Nuklidvektoren und der Einhaltung der Aktivitätsgrenzwerte nach [BFS 14]. Die bei Betrachtung eines auslegungüberschreitenden Ereignisses radiologisch wenig relevanten Nuklide H-3 und C-14 sind zur Übersichtlichkeit weggelassen.

Typ	NV	APG / Abfalltyp	AGG	Aktivität pro Gebinde [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
Behälter Typ II	A	APG 03 (störfallfest)	AGG 8 <sup>(a)</sup>	$2,3 \cdot 10^{14}$	$2,3 \cdot 10^{14}$	$2,3 \cdot 10^{14}$	0	0	0
	K			$4,7 \cdot 10^{12}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{12}$	$5,0 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{10}$
Behälter Typ II	K	APG 01 – 05	AGG 8 <sup>(a)</sup>	$3,2 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,4 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^{10}$
KC II	A	APG 03	AGG 3	$4,6 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{11}$	0	0	0
	K			$1,0 \cdot 10^{11}$	0	0	$4,4 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$
KC II-V <sup>(c)</sup>	K	APG 01 – 02	AGG 2	$1,1 \cdot 10^{11}$	0	0	$4,7 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^9$
KC II-V	K	APG 03 – 05	AGG 4/5 <sup>(b)</sup>	$3,2 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,4 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^{10}$

NV= Nuklidvektor, A = Aktivierung, K = Kontamination

- <sup>(a)</sup> Gussbehälter unabhängig vom Inhalt in AGG 8
- <sup>(b)</sup> Höchste Freisetzunganteile der möglichen AGG-Zuordnungen
- <sup>(c)</sup> Begrenzung für Container Typ II – V gilt auch für KC IV mit VKZ, da diese nur in APG 02 eingeordnet werden können

Bei einem Flugzeugabsturz ohne Folgebrand finden Freisetzungen nur aus den durch mechanische Einwirkung betroffenen Gebinden statt. Da die Anzahl dieser Gebinde mit 28 bzw. 56 relativ gering ist, wird für das Aktivitätsinventar dieser Gebinde jeweils die maximal zulässige Einzelaktivität aus Tabelle 3-5 verwendet.

Bei einem Flugzeugabsturz mit Folgebrand muss zwischen Gebinden unterschieden werden, die nur vom Folgebrand betroffen sind und solchen, die sowohl mechanisch als auch vom Folgebrand betroffen sind. Für die mechanisch und thermisch belasteten Gebinde gilt das für einen Flugzeugabsturz ohne Folgebrand aufgeführte, somit werden für diese Gebinde die in Tabelle 3-5 aufgeführten maximalen Aktivitäten verwendet. Aufgrund der großen Anzahl der vom Folgebrand ohne weitere mechanische Belastung betroffenen Gebinde wird für diese Gebinde das mittlere Aktivitätsinventar pro Gebinde verwendet, welches in Tabelle 3-6 aufgeführt ist.

Dabei werden mehrere Szenarien betrachtet, um das konservativste zu finden, welches zur höchsten potentiellen Folgedosis führt. Die Zuordnung der mittleren Aktivitäten zu den Gebinden ist in Tabelle 3-6 aufgeführt. Diese Zuordnung ergibt sich aus typischerweise vorliegenden Aktivitäten der verschiedenen Abfalltypen und führt bei Vollbelegung des LasmAaZ zu einer insgesamt eingelagerten Aktivität von  $2 \cdot 10^{17}$  Bq.

Eine genaue Aufstellung der betroffenen Aktivitäten befindet sich bei der Beschreibung der einzelnen Szenarien in Abschnitt 4.

Die Nuklide H-3 und C-14 werden im Folgenden 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.

Tabelle 3-6: Verteilung des gesamten Aktivitätsinventars auf die Gebinde

Typ	Inventar	NV	Anzahl	mittlere Aktivität / Gebinde [Bq]						
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241	Summe
Behälter Typ II	Akt. Met.	A	300	$2,2 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{14}$	0	0	0	$6,6 \cdot 10^{14}$
		K	300	$4,6 \cdot 10^{12}$	0	0	$2,0 \cdot 10^{12}$	$4,9 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{12}$
	Misch.	K	100	$6,9 \cdot 10^{11}$	0	0	$2,9 \cdot 10^{11}$	$7,3 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{12}$
KC II-V	Akt. Met.	A	175	$4,6 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{11}$	0	0	0	$1,4 \cdot 10^{12}$
		K	175	$1,0 \cdot 10^{11}$	0	0	$4,4 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{11}$
KC II-V	VKZ / Misch.	K	325	$1,1 \cdot 10^{11}$	0	0	$4,7 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{11}$
KC II-V	APG 03 – 05	K	300	$2,5 \cdot 10^{11}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,7 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^{11}$
Summe			1200							

NV= Nuklidvektor, A = Aktivierung, K = Kontamination

Für KC IV mit Verdampferkonzentraten (VKZ) ist keine separate Beschränkung der Aktivität eines Gebindes vorgesehen, hier gelten die in Tabelle 3-5 angegebenen Maximalwerte für KC II – V (APG 01 – 02). In den nachfolgenden Betrachtungen zur Freisetzung aus den Gebinden werden daher KC IV mit VKZ nicht getrennt aufgeführt, sondern mit den KC II – V (APG 01 – 02) berücksichtigt. Für mechanisch betroffene Gebinde wird dabei die Maximalaktivität verwendet.

### 3.3.4. Zuordnung der Freisetzungsteile zu den Gebinden

Die Zuordnung der Freisetzungsteile zu den betroffenen Gebinden erfolgt, indem für die mechanisch und thermisch betroffenen Gebinde die Belastungsklasse BK 8 bzw. die Freisetzungsteile nach [SER 10] angesetzt werden. Für nur thermisch betroffene Gebinde wird Belastungsklasse BK 2 verwendet, für nur mechanisch betroffene Gebinde BK 7 (mit dem in Abschnitt 2.1.1.3 beschriebenen Korrekturfaktor für die Behältergröße).

Für als Aktivierung vorliegende Aktivität wird von keiner Freisetzung ausgegangen. In Gussbehältern vorliegende Kontamination wird AGG 8 zugeordnet, dies gilt auch für den Kontaminationsanteil an aktivierten Metallen. Für Container mit Kontamination an aktivierten Metallen erfolgt die Einordnung in AGG 3. KC II – V, die Abfälle der APG 03 – 05 enthalten, werden konservativ in AGG 5 eingeordnet. Da je nach Größenklasse der Partikel entweder die Freisetzungsteile für AGG 4 oder AGG 5 größere Werte besitzen, wurde hier geprüft, dass bei den im vorliegenden Bericht durchgeführten Berechnung in Summe AGG 5 zu den konservativeren Dosiswerten führt.

Bei allen anderen Behältern wird konservativ AGG 1 (brennbare Abfälle) oder AGG 2 (nicht brennbare Abfälle) verwendet. Eine Zusammenfassung der Zuordnung ist in Tabelle 3-7 und Tabel-

le 3-8 angegeben. Bei thermischer Belastung werden die Freisetzungsteile nach [GRS 17] für Co-60, Ni-63, Fe-55, Sr-90 und Am-241 wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben für Partikel mit einem AED bis 10 µm noch mit einem Faktor 0,1 reduziert.

Tabelle 3-7: Bei der Bestimmung der Quellterme verwendete Freisetzungsteile (mechanische Belastung)

Gebinde-/Abfalltyp	AGG	ARF für BK 7	
		bis 10 µm	ab 10 µm
Aktivierung (unabhängig vom Gebinde)	-	0	0
Behälter Typ II	AGG 8	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0
Kontamination an metallischen Reststoffen in Containern	AGG 3	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$
APG 03 – 05	AGG 5	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
nicht brennbare Abfälle in Containern	AGG 2	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
brennbare Abfälle in Containern	AGG 1	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 3-8: Bei der Bestimmung der Quellterme verwendete Freisetzungsteile (thermische und mechanische Belastung)

Gebinde-/Abfalltyp	AGG bzw. Zitat	ARF für BK 2		ARF für BK 8	
		bis 10 µm	ab 10 µm	bis 10 µm	ab 10 µm
Aktivierung (unabhängig vom Gebinde)	-	0	0	0	0
Behälter Typ II	AGG 8	$1,1 \cdot 10^{-7}$ (a)	0	$2,2 \cdot 10^{-4}$ (a)	0
Kontamination an metallischen Reststoffen in Containern	AGG 3 / [SER 10]	$2,0 \cdot 10^{-4}$ (b)	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$ (b)	$6,0 \cdot 10^{-6}$
APG 03 – 05	AGG 5 / [SER 10]	$2,1 \cdot 10^{-4}$ (a)	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$ (b)	$1,4 \cdot 10^{-5}$
nicht brennbare Abfälle in Containern	AGG 2 / [SER 10]	$1,2 \cdot 10^{-3}$ (a)	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$ (b)	$6,0 \cdot 10^{-4}$
brennbare Abfälle in Containern	AGG 1 / [SER 10]	$1,0 \cdot 10^{-1}$ (a)	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$ (b)	$6,0 \cdot 10^{-4}$

(a) Wert für Cs-137, die anderen Nuklide wurden mit einem Faktor 0,1 korrigiert

(b) Wert für Cs-137, es werden die Werte nach [SER 10] verwendet

### **3.4. Meteorologische Daten**

Für die probabilistischen Ausbreitungsberechnungen wurden meteorologische Daten aus dem Zeitraum von 2010 bis 2014 in Form einer Zeitreihe ausgewertet, indem aus diesem Zeitbereich nach dem in [VDI 15] angegebenen Verfahren ein repräsentatives Jahr bestimmt wurde. Zusätzlich zu den meteorologischen Parametern, die nach [VDI 15] bei der Auswahl des repräsentativen Jahres zu betrachten sind, wurden im Folgenden noch Daten für die Niederschlagsmenge berücksichtigt.

Die bei der Auswahl des repräsentativen Jahres betrachteten meteorologischen Parameter sind:

1. Windrichtungsverteilung

2. Nacht- und Schwachwindverteilung
3. Windgeschwindigkeit
4. Ausbreitungsklasse
5. Niederschlag (zusätzlich zu [VDI 15])

Daten zu Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden zur Auswahl des repräsentativen Jahres im Folgenden in einer Messhöhe von 150 m verwendet.

Für jeden dieser Parameter wird ein Bewertungsterm  $\chi_i^2$  berechnet. Diese Bewertungsterme werden gewichtet zu einem Gesamtbewertungsparameter  $\chi^2$  summiert:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^5 \chi_i^2 \cdot G_i \quad (\text{G 3-1})$$

Die Gewichtungsfaktoren  $G_i$  nach [VDI 15] sind in Tabelle 3-9 angegeben. Weiterhin sind die in diesem Bericht verwendeten Gewichtungsfaktoren bei der Berücksichtigung des Niederschlages aufgeführt. Diese wurden gebildet, indem für  $i = 1$  bis 4 die Gewichtungsfaktoren nach [VDI 15] angesetzt wurden und für  $i = 5$  (Niederschlag) zusätzlich ein Gewichtungsfaktor 0,2 angesetzt wurde. Die sich dabei ergebenden Werte wurden dann noch normiert, so dass die Summe  $\sum_{i=1}^5 G_i = 1$  ergibt.

Tabelle 3-9: Gewichtungsfaktoren für die Bewertungsparameter bei der Bestimmung des repräsentativen Jahres nach [VDI 15].

<i>i</i>	Parameter	$G_i$ (nach [VDI 15])	$G_i$ (mit Niederschlag)
1	Windrichtungsverteilung	0,36	0,3
2	Nacht- und Schwachwindverteilung	0,15	0,125
3	Windgeschwindigkeit	0,24	0,2
4	Ausbreitungsklasse	0,25	0,208
5	Niederschlag	-	0,167

Die einzelnen Bewertungsterme  $\chi_i^2$  ergeben sich aus

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(x_{i,j,abs} - \bar{x}_{i,j,abs})^2}{\bar{x}_{i,j,abs}} \cdot \bar{x}_{i,j,rel} \quad (\text{G 3-2})$$

mit

- i* Index für betrachtete Bewertungsparameter
- m* Anzahl der Klassen, in die der Parameter eingeteilt wurde
- j* Klassenindex ( $1 \leq j \leq m$ )
- $x_{i,j,abs}$  Wert (absolute Häufigkeit in Stunden/Jahr) des Parameters  $x_i$  in der Klasse *j* für ein Einzeljahr
- $\bar{x}_{i,j,abs}$  Wert (absolute Häufigkeit in Stunden/Jahr) des Parameters  $x_i$  in der Klasse *j* für alle verwendeten Jahre

$\bar{x}_{i,j,rel}$  Wert (relative Häufigkeit in Stunden/gesamte Stunden im Jahr) des Parameters  $x_i$  in der Klasse  $j$  für alle verwendeten Jahre

Die Einteilung der auszuwertenden Parameter in Klassen erfolgt dabei nach folgendem Schema:

1. Windrichtungsverteilung:  
Die Windrichtung wird in 12 Sektoren zu je 30° eingeteilt. Dabei werden alle Windgeschwindigkeiten betrachtet.
2. Nacht- und Schwachwindverteilung:  
Die Windrichtung wird in 12 Sektoren zu je 30° eingeteilt. Dabei werden nur mittlere Windgeschwindigkeiten  $\leq 2$  m/s in der Zeit von 18:00 UTC bis 6:00 UTC betrachtet.
3. Windgeschwindigkeit:  
Nach [VDI 15] erfolgt die Einteilung der Windgeschwindigkeiten in 2 m/s-Klassen. Abweichend davon erfolgt im vorliegenden Bericht eine erweiterte Einteilung der Windgeschwindigkeit in Klassen nach der TA Luft [BMU 02] (siehe Tabelle 3-10).
4. Ausbreitungsklasse:  
Es werden die 6 Diffusionskategorien A bis F verwendet.
5. Niederschlagsmenge:  
Die Einteilung der Niederschlagsmenge erfolgt in die 4 Klassen:
  - kein Niederschlag,
  - Niederschlag  $> 0$  mm/h bis 0,5 mm/h,
  - Niederschlag  $> 0,5$  mm/h bis 3 mm/h und
  - Niederschlag  $> 3$  mm/h.

Tabelle 3-10: Einteilung der Windgeschwindigkeitsklassen nach der TA Luft [BMU 02]

Windgeschwindigkeitsklasse	Windgeschwindigkeit in m/s	
	Bereich	Rechenwert
1	< 1,4	1
2	1,4 bis 1,8	1,5
3	1,9 bis 2,3	2
4	2,4 bis 3,8	3
5	3,9 bis 5,4	4,5
6	5,5 bis 6,9	6
7	7,0 bis 8,4	7,5
8	8,5 bis 10,0	9
9	> 10,0	12

Zusätzlich zu den Bewertungsparametern  $\chi_i^2$  wird für jeden betrachteten Parameter noch eine Trefferquote  $TQ_i$  bestimmt. Dazu verwendet man die Mittelwerte  $\bar{x}_{i,j,abs}$  und die Standardabweichungen  $\sigma_{i,j}$  für jede Klasse  $j$  und bestimmt die Anzahl, wie oft die Bedingung

$$\bar{x}_{i,j,abs} - \sigma_{i,j} < x_{i,j,abs} < \bar{x}_{i,j,abs} + \sigma_{i,j} \quad (G 3-3)$$

bei festgehaltenem  $i$  erfüllt ist. Diese Anzahl ist der Wert von  $TQ_i$ . Daraus bestimmt man die Gesamtzahl der Treffer zu

$$TQ = \sum_{i=1}^5 TQ_i \cdot G_i \quad (\text{G 3-4})$$

Die Bewertungsgrößen  $\chi^2$  und  $TQ$  werden für jedes Jahr aus dem Betrachtungszeitraum berechnet. Dann erfolgt eine Sortierung der betrachteten Jahre nach  $\chi^2$  (mit dem am besten passenden Jahr, also dem kleinsten Wert für  $\chi^2$ , auf dem 1. Rang) sowie nach  $TQ$  (mit dem am besten passenden Jahr, also dem größten Wert für  $TQ$ , auf dem 1. Rang). Die Auswahl des repräsentativen Jahres erfolgt nach folgenden Kriterien:

1. Falls das Jahr auf dem 1. Rang der  $\chi^2$ -Liste und auf dem 1. Rang der  $TQ$ -Liste identisch ist, wird dieses gewählt.
2. Ansonsten wird das Jahr auf dem 1. Rang der  $\chi^2$ -Liste gewählt, falls es sich auf dem 2. oder 3. Rang der  $TQ$ -Liste befindet.
3. Ansonsten wird das Jahr auf dem 2. oder 3. Rang der  $\chi^2$ -Liste gewählt, falls es sich unter den ersten drei Rängen der  $TQ$ -Liste befindet.
4. Falls keine der Bedingungen erfüllt werden kann, wird der Kandidat aus den ersten drei Rängen der  $\chi^2$ -Liste und der  $TQ$ -Liste gewählt, der die beste Übereinstimmung in Bezug auf die Struktur der Windrichtungsverteilung und der Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen besitzt.

Für den hier betrachteten Zeitraum ergeben sich die in Tabelle 3-11 angegebenen Bewertungsparameter.

Tabelle 3-11: Bewertungsparameter  $\chi^2$  und  $TQ$  für die Jahre im betrachteten Zeitraum sortiert nach  $\chi^2$

Rang in $\chi^2$ -Liste	Jahr	$\chi^2$	$TQ$	Rang in $TQ$ -Liste
1	2013	12,5	6,6	1
2	2010	17,7	4,7	4
3	2014	24,2	5,5	2
4	2011	26,5	5,1	3
5	2012	41,0	4,6	5

Für den vorliegenden Zeitraum erfüllt das Jahr 2013 das oben aufgeführte erste Kriterium und kann somit als repräsentatives Jahr verwendet werden.

Für eine Darstellung<sup>13</sup> in diesem Bericht wird die zur Ermittlung des repräsentativen Jahres verwendete Klasseneinteilung der Daten verwendet.

<sup>13</sup> Die Klasseneinteilung dient hier allein Darstellungszwecken. Für die Berechnung werden die einzelnen Stundenwerte direkt verwendet.

Abbildung 3-8 zeigt die Windrichtungsverteilung am Standort für die Messhöhe von 150 m.

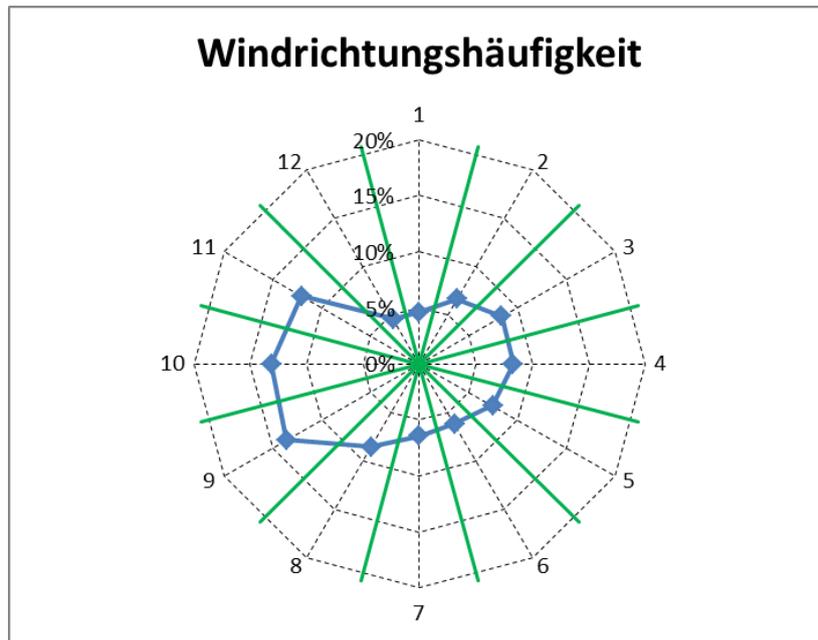


Abbildung 3-8: Windrichtungshäufigkeit am Standort, repräsentatives Jahr 2013 (Häufigkeit auf den Radialachsen, Sektornummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet)

Am häufigsten wird Wind aus Sektor 9 bis 11 beobachtet (Westwind). Ein zweites kleineres Maximum erkennt man für Wind aus den Sektoren 3 und 4 (Ostwind). Am seltensten werden dagegen Wind aus den Sektoren 1, und 12 sowie Wind aus den Sektoren 6 und 7 beobachtet.

In Abbildung 3-9 ist die mittlere jährliche Niederschlagsmenge dargestellt, die bei den auftretenden Windrichtungen beobachtet wird (Niederschlagswindrose). Die meisten Niederschläge sind mit den Hauptwindrichtungen (Sektoren 9 bis 11) verbunden.

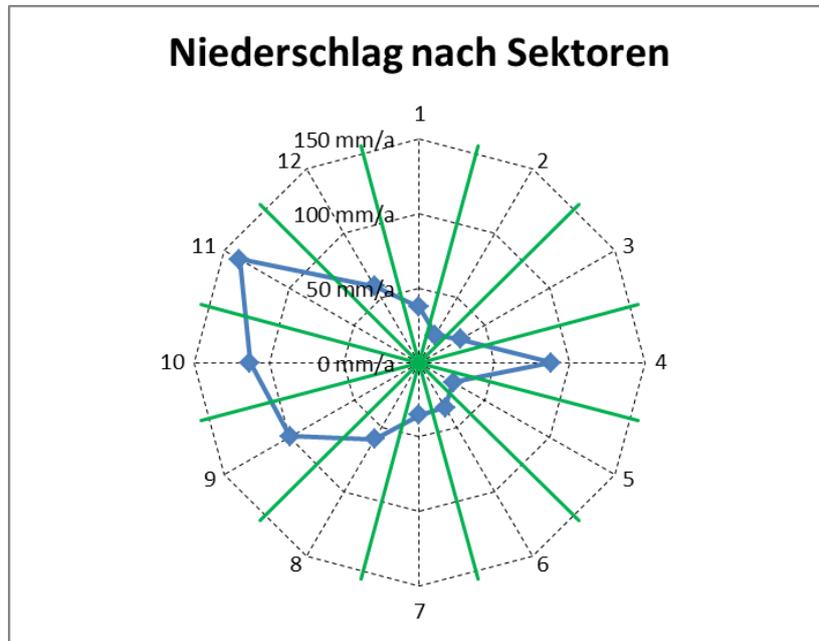


Abbildung 3-9: Verteilung der Niederschlagsmengen nach Sektoren für das repräsentative Jahr 2013 (mittlere Jahresniederschlagsmenge auf den Radialachsen, Sektornummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet)

In Abbildung 3-10 ist die Häufigkeit der beobachteten Niederschlagsintensitäten (aufgeteilt auf die in Tabelle 3-12 aufgeführten vier Klassen) dargestellt. In ca. 90 % der Beobachtungsintervalle (Intervalllänge jeweils eine Stunde) wird kein Niederschlag beobachtet. Die jeweilige mittlere Intensität in den einzelnen Klassen ist ebenfalls in Tabelle 3-12 angegeben.

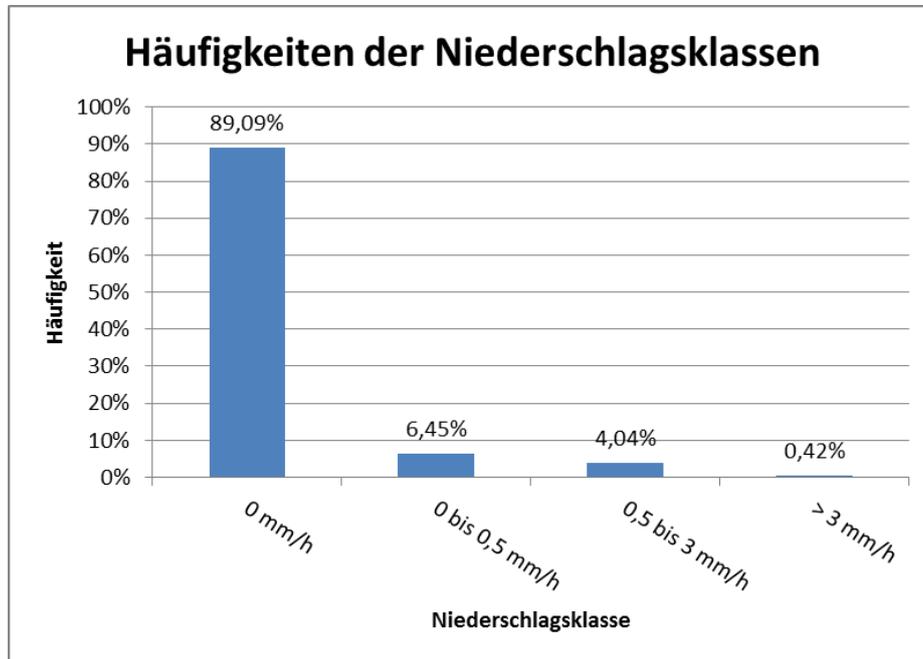


Abbildung 3-10: Verteilung der Häufigkeiten einzelner Niederschlagsklassen für das repräsentative Jahr 2013

Tabelle 3-12: Niederschlagsklassen für das repräsentative Jahr 2013

Niederschlagsklasse	Wert [mm/h]
0 mm/h	0,000
0 bis 0,5 mm/h	0,185
0,5 bis 3 mm/h	1,155
> 3 mm/h	6,246

Abbildung 3-11 zeigt die Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen für die Messhöhe 150 m. Der Mittelwert der Windgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum 2010 bis 2014 beträgt 6,4 m/s.

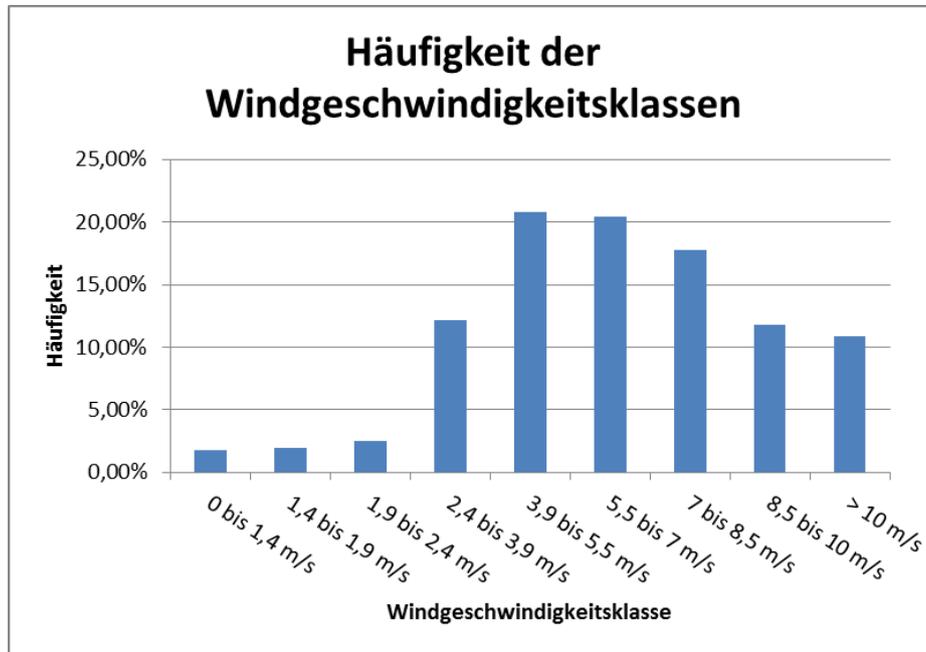


Abbildung 3-11: Verteilung der Häufigkeiten der Windgeschwindigkeitsklassen für das repräsentative Jahr 2013

Abbildung 3-12 zeigt die Häufigkeit der Ausbreitungsklassen (A bis F, entsprechend V bis I nach Klug/Manier). Dabei wird die neutrale Ausbreitungsklasse D im Betrachtungszeitraum von 2010 bis 2014 am häufigsten beobachtet. Diese tritt in ca. 45 % der Situationen auf.

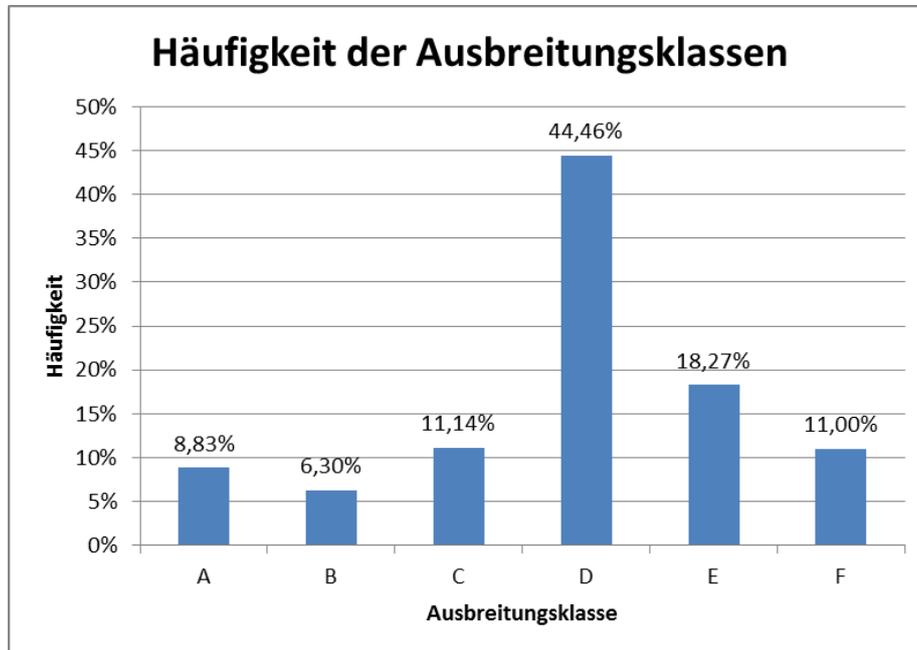


Abbildung 3-12: Verteilung der Häufigkeiten der Ausbreitungsklassen (A bis F) für das repräsentative Jahr 2013

### 3.5. Bemerkungen zur Methodik bei der probabilistischen Ausbreitungsrechnung

Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen erfolgen in Anlehnung an die Vorgaben in [BMU 14].

Aus den meteorologischen Daten der Jahre 2010 bis 2014 wurde ein repräsentatives Jahr bestimmt, welches für die Ausbreitungsberechnungen verwendet wird. Für die Zeitreihe des repräsentativen Jahres (Stundenwerte) erfolgt eine ARTM-Ausbreitungsrechnung über eine Zeitdauer von jeweils einem Tag, wobei eine Freisetzungsdauer von 1 Stunde angesetzt wird. Dies ist abdeckend gegenüber länger andauernden Freisetzungen, da sich durch eine Veränderung der meteorologischen Situation während der Freisetzung die potentiell freigesetzten Radionuklide in andere Richtungen ausbreiten. Die Auflösung der Eingangsdaten der meteorologischen Zeitreihe beträgt 1° für die Windrichtung, 0,1 m/s für die Windgeschwindigkeit und 0,1 mm/h für die Niederschlagsmenge.

Um den Durchzug der freigesetzten Radionuklide über das komplette Rechengebiet zu betrachten, erstreckt sich die Ausbreitungsrechnung für eine Freisetzung insgesamt über einen Tag, also in der ersten Stunde mit Freisetzung und Ausbreitung der Radionuklide und in den verbleibenden 23 Stunden nur noch mit Ausbreitung der Radionuklide.

Aus den ARTM-Ausbreitungsrechnungen ergeben sich dann für jede meteorologische Situation Mittelwerte für die Konzentrationen, die trockenen Depositionen, die nassen Depositionen und die Gammawolkenstrahlung ( $\gamma$ -Submersion). Die Mittelwerte beziehen sich jeweils auf den Simulationszeitraum. Die Berechnungen erfolgen mit einer normierten Freisetzung von 1 Bq, eine Skalierung auf die tatsächlich freigesetzte Aktivität erfolgt erst bei der nachfolgenden Dosisberechnung. Da für alle betrachteten Radionuklide der Beitrag durch Gammawolkenstrahlung gegenüber den

anderen Anteilen vernachlässigbar ist<sup>14</sup> und die Berechnung dieses Anteils wesentlich zeitaufwändiger ist als die Berechnung der anderen Beiträge, wird auf die Einbeziehung der Gammawolkenstrahlung verzichtet.

Da bei der Berechnung der Folgedosis nicht die mittleren Konzentrationen und Depositionen, sondern die insgesamt über den Zeitraum abgelagerte Menge bzw. vorhandene Konzentration ausschlaggebend ist, werden die mit ARTM berechneten Werte noch mit der Anzahl der Zeitschritte (hier also 24) multipliziert.

Auf eine Ausgabe der ARTM-Ergebnisse als Zeitreihe wurde verzichtet, da diese nur für in der ARTM-Eingabedatei definierte Beurteilungspunkte möglich ist. Die Anzahl dieser Punkte ist in der aktuellen ARTM-Version (2.8.0) auf 100 beschränkt. Bei der Unterteilung der Ausbreitungsrichtungen in 12 Sektoren können daher ca. 8 bis 9 Beurteilungspunkte pro Sektor festgelegt werden. Da ARTM über einen Coriolis-Parameter eine Windrichtungsrotation mit der Höhe berücksichtigt, ist auch bei der Verwendung von Beurteilungspunkten genau in Ausbreitungsrichtung somit nicht gewährleistet, dass die maximale Konzentration bzw. Ablagerung an dem entsprechenden Punkt auftritt. Durch die beschränkte Anzahl der Beurteilungspunkte kann daher bei Zeitreihen keine größere Ausdehnung einer Wohnbebauung bzw. Arbeitsstätte berücksichtigt werden.

Aus den Werten für die bodennahe Konzentration, die trockene Deposition und die nasse Deposition, die bei der Ausbreitungsrechnung für eine meteorologische Ausbreitungssituation gewonnen werden, werden dann für jeden als Polygonzug definierten Betrachtungsbereich (siehe Abbildung 3-6) die maximalen Werte bestimmt. Wenn mehrere ARTM-Rechengitter definiert wurden, werden dabei die Maxima über alle Gitter bestimmt. Dadurch ergeben sich für jeden Betrachtungsbereich ein Maximalwert für die bodennahe Konzentration, ein Maximalwert für die trockene Deposition und ein Maximalwert für die nasse Deposition. Je nach Größe des Betrachtungsbereichs treten die Maximalwerte unter Umständen an unterschiedlichen Orten in diesem Bereich auf, es wird also ein (gleichzeitiger) Aufenthalt an verschiedenen Orten in einem Bereich unterstellt. Da allerdings die Maximalwerte verwendet werden, ist dieses Vorgehen konservativ.

Wenn mindestens einer der so für eine meteorologische Situation bestimmten Werte für die bodennahe Konzentration, nasse Deposition oder trockene Deposition von 0 verschieden ist, werden die Werte mit einem Index für die meteorologische Situation und der Nummer des betrachteten Bereichs in eine Datei geschrieben, um eine effektive und rechenzeitsparende Speichernutzung zu ermöglichen.

Nachdem Ausbreitungsberechnungen für alle auftretenden meteorologischen Situationen durchgeführt wurden, liegt somit eine Liste aller Ausbreitungssituationen vor, in der für alle Betrachtungsbereiche die jeweiligen Maximalwerte für die bodennahe Konzentration, nasse Deposition oder trockene Deposition vorhanden sind. Für alle diese Werte werden dann Dosisrechnungen für die 7-Tage-Folgedosis und die 1-Jahres-Folgedosis durchgeführt. Dabei werden je nachdem, ob Wohnbebauung oder Arbeitsstätten betrachtet werden, die unterschiedlichen Aufenthaltszeiten nach Tabelle 2-10 verwendet. Da sich der Aufenthalt an Arbeitsstätten nicht über den gesamten Zeitraum erstreckt, wird konservativ unterstellt, dass die Aufenthaltsdauer an einem Stück am Anfang des Zeit-

---

<sup>14</sup> Dies wurde durch Anwendung des Modells BS-SBG (Gauß-Fahnenmodell für die Ausbreitung) geprüft.

raums liegt. Damit wird bei Nukliden mit kurzen Halbwertszeiten (verglichen mit der betrachteten Aufenthaltsdauer) die Dosisabnahme durch radioaktiven Zerfall unterschätzt und somit die potentielle Dosis überschätzt. Dieser Effekt ist jedoch bei den hier verwendeten Nukliden und Einwirkungsdauern sehr gering.

Bei der Berechnung der Dosis für den Aufenthalt bei Wohnbebauung werden nur die Bereiche ausgewertet, die als Wohnbebauung definiert sind. Bei der Berechnung der Dosis für den Aufenthalt an Arbeitsstätten werden alle definierten Bereiche ausgewertet, allerdings mit den Aufenthaltszeiten für Arbeitsstätten.

Die Dosisberechnungen und statistischen Auswertungen erfolgen getrennt für die 7-Tage-Folgedosis und für die 1-Jahres-Folgedosis. Dabei werden jeweils die bei einer meteorologischen Situation maximal auftretende Inhalationsdosis und die maximale Dosis durch Bodenstrahlung bestimmt. Da die Dosis durch Inhalation beim Durchzug der Wolke verursacht wird und Dosis durch Bodenstrahlung durch den weiteren Aufenthalt, sind hierfür Orte in unterschiedlichen Betrachtungsbereichen möglich. Diese beiden Werte werden dann summiert. Danach liegt eine Liste der für jede meteorologische Ausbreitungssituation auftretenden potentiellen Effektivdosis vor. Unter Berücksichtigung der Häufigkeiten der Ausbreitungssituationen wird dann der Wert der Dosis bestimmt, der größer ist als 95 % der Dosiswerte. Also liegen nur in 5 % der Ausbreitungssituationen Dosiswerte über diesem 95 %-Quantil vor.

Da die Ergebnisse von ARTM von der Anzahl der in der Ausbreitungsberechnung verwendeten Teilchen abhängen, werden mindestens zwei Analysen wie oben beschrieben durchgeführt. Dabei wird die Qualitätsstufe, die in ARTM die Teilchenzahl festlegt, um 1 erhöht. Wenn sich dabei relevante Auswirkung auf die Bestimmung des 95 %-Quantils ergeben, muss die ARTM-Qualitätsstufe weiter erhöht werden.

## **4. DOSISBERECHNUNGEN**

### **4.1. Ausbreitungsberechnungen**

#### **4.1.1. Bestimmung der effektiven Emissionshöhe**

Da die Korrektur der effektiven Emissionshöhe nach (G 2-7) aus Abschnitt 2.2.5 nicht direkt in ARTM verwendet werden kann, wurde die mit (G 2-7) korrigierte Emissionshöhe für verschiedene Durchmesser des sich bildenden Kerosin-pools bei einem konstanten Wärmestrom berechnet. Da eine große thermische Überhöhung zu niedrigeren potentiellen Expositionen führt, wurde der abdeckend niedrige Wert von  $M = 5$  MW verwendet, der aus der Abschätzung des Wärmestroms bei der Verwendung eines Sammelvolumens für das Kerosin resultiert (siehe Abschnitt 2.1.2.2). Die größere Ausdehnung des Kerosin-pools bei nicht vorhandenem Sammelvolumen führt zu einer kürzeren Branddauer und damit zu einem höheren Wärmestrom.

Dann wurde die Überhöhung für einen geringeren Wärmestrom  $M_{\text{kor}}$  ohne Korrektur auf den Pool-durchmesser so berechnet, so dass sich eine geringere effektive Emissionshöhe als im Fall der 5 MW mit Korrektur ergibt. Exemplarisch ist in Abbildung 4-1 für zwei Ausbreitungsklassen und Windgeschwindigkeiten die Abhängigkeit der effektiven Emissionshöhe  $H$  von der Entfernung  $x$

zur Emissionsquelle für Pool-Radien bis zu 50 m gezeigt. Die Korrektur wird während der Ausbreitungsrechnung in Abhängigkeit von der meteorologischen Ausbreitungssituation durchgeführt, d. h. der effektiv verwendete Wärmestrom hängt von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen ab. Da die Außenabmessungen des LasmAaZ 65 m × 48 m betragen, ist der große Radius des Kerosin-pools von 50 m in diesem Fall abdeckend.

Für jeden 24 h-Zeitraum, der bei den Ausbreitungsberechnungen verwendet wurde, wurde aus einem ursprünglichen Wärmestrom von 5 MW ein abdeckend niedriger Wärmestrom für die auftretenden Ausbreitungsbedingungen nach obigem Formalismus abgeleitet. Dieser wurde dann bei der jeweiligen Ausbreitungsberechnung verwendet.

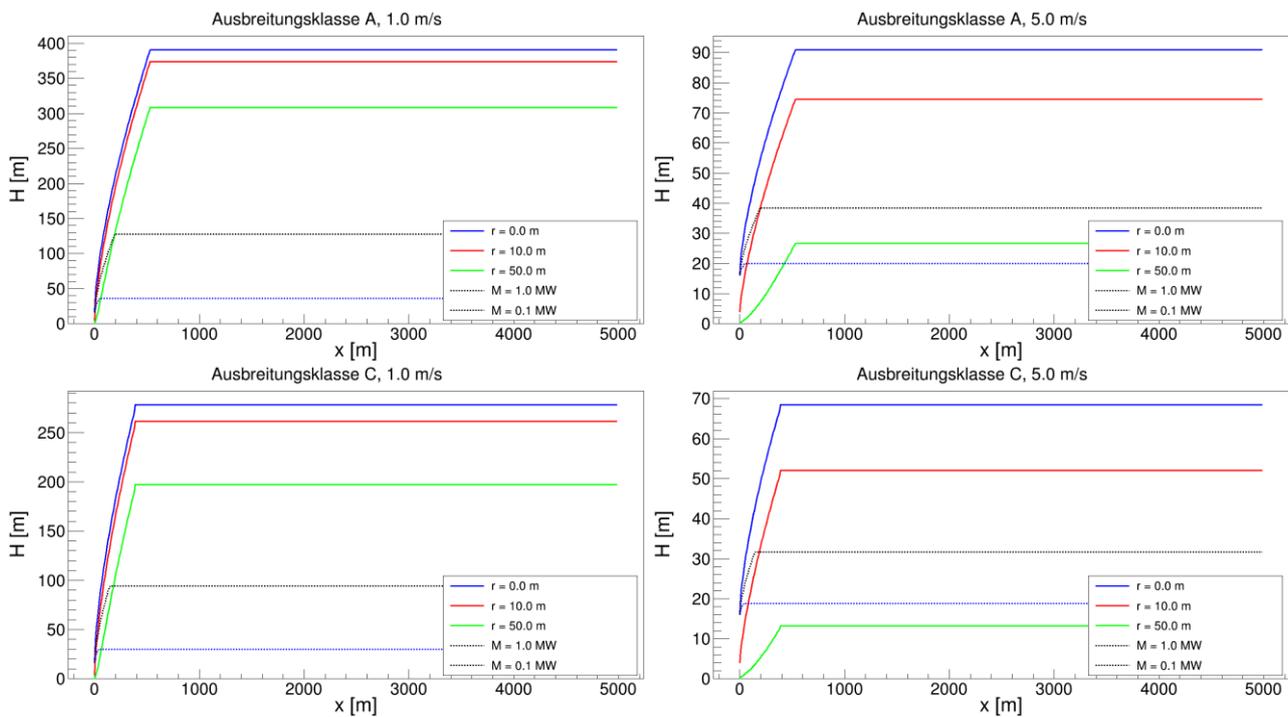


Abbildung 4-1: Vergleich für die Überhöhung H in einer Entfernung x von der Emissionsquelle bei unterschiedlichen Radien des Kerosin-pools

#### 4.1.2. Rechengitter

Für die Ausbreitungsberechnungen in ARTM wurden mehrere geschachtelte Rechengitter definiert, die sich maximal über einen Bereich von 51,2 km × 51,2 km erstrecken, dessen Ursprung auf das LasmAaZ zentriert ist. Die verwendete Unterteilung ist in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Bei den ARTM-Ausbreitungsrechnungen verwendete Rechengitter

Nr.	$x_{\min} = y_{\min}$ [m]	Schrittweite [m]	Anzahl in x und y
1	-800	16	100
2	-1600	32	100
3	-3200	64	100
4	-6400	128	100
5	-12800	256	100
6	-25600	512	100

## 4.2. Absturz eines Militärflugzeuges ohne Folgebrand

### 4.2.1. Quelltermmittlung

#### 4.2.1.1. Betroffenes Inventar

Wie in Abschnitt 2.1.2.1 beschrieben, wird je nach Gebindemasse von 28 bzw. 56 mechanisch betroffenen Gebinden ausgegangen. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Gebinden wird angenommen, dass in den betroffenen Gebinden das maximal mögliche Aktivitätsinventar gemäß Tabelle 3-5 vorliegt. Um die Wahl der betroffenen Gebinde konservativ zu treffen, wird davon ausgegangen, dass jeweils 28 bzw. 56 Gebinde eines bestimmten gleichen Gebindetyps und einer bestimmten Abfallsorte betroffen sind und diese Auswahl wird für die verschiedenen möglichen Gebindetypen und Abfallsorten variiert. Damit ergeben sich in Abhängigkeit vom Typ die in Tabelle 4-2 angegebenen potentiell betroffenen nuklidspezifischen Aktivitäten.

Tabelle 4-2: Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand im LasmAaZ betroffene Aktivitäten

Anzahl und Typ	NV	APG / Abfalltyp	AGG	betroffene Aktivität [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
56 Behälter Typ II	A	APG 03	AGG 8	$1,3 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	0	0	0
	K			$2,7 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	$3,9 \cdot 10^{12}$
56 Behälter Typ II	K	APG 01 – 05	AGG 8	$1,8 \cdot 10^{14}$	0	0	$7,6 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	$2,6 \cdot 10^{12}$
28 KC II	A	APG 03	AGG 3	$1,3 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	0	0	0
	K			$2,9 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,2 \cdot 10^{12}$	$3,1 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^{10}$
28 KC II-V <sup>(a)</sup>	K	APG 01 – 02	AGG 2	$3,1 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,3 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^{10}$
28 KC II-V	K	APG 03 – 05	AGG 5	$8,9 \cdot 10^{13}$	0	0	$3,8 \cdot 10^{13}$	$9,4 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{12}$

<sup>(a)</sup> Beinhaltet auch KC IV mit VKZ

**4.2.1.2. Freigesetzte Aktivität**

Die Freisetzungsteile aus den Behältern werden gemäß Abschnitt 3.3.4 den Gebinden zugeordnet. Es wird zwar davon ausgegangen, dass durch den Absturz „nur“ ein Loch in der Außenwand verursacht wird, konservativ wird allerdings keine Rückhaltungswirkung durch das Gebäude unterstellt ( $LPF = 1$ ). Damit ergeben sich die in Tabelle 4-3 angegebenen potentiell freigesetzten Aktivitäten.

Tabelle 4-3: Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand im LasmAaZ freigesetzte Aktivitäten

	AED	Behälter Typ II		Behälter Typ II	KC II		KC II – V <sup>b)</sup>	KC II – V
		APG 03		APG 01 – 05	APG 03		APG 01 – 02	APG 03 – 05
		A	K	K	A	K	K	K
		AGG 8	AGG 8	AGG 8	AGG 3	AGG 3	AGG 2	AGG 5
<b>Freisetzungsteile (BK 7)</b>								
$ARF^a)$	$\leq 10 \mu m$	0	$3,0^{\circ} \cdot 10^{-8}$	$3,0^{\circ} \cdot 10^{-8}$	0	$3,0^{\circ} \cdot 10^{-6}$	$3,0^{\circ} \cdot 10^{-4}$	$3,0^{\circ} \cdot 10^{-6}$
	$> 10 \mu m$	0	0	0	0	$6,0^{\circ} \cdot 10^{-6}$	$6,0^{\circ} \cdot 10^{-4}$	$1,4^{\circ} \cdot 10^{-5}$
<b>Faktor für Gebäuderückhaltung</b>								
$LPF$	$\leq 10 \mu m$	1						
	$> 10 \mu m$	1						
<b>potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]</b>								
$ST$ (Co-60)	$\leq 10 \mu m$	0	$8,0 \cdot 10^6$	$5,3 \cdot 10^6$	0	$8,7 \cdot 10^6$	<b><math>9,2 \cdot 10^8</math></b>	$2,7 \cdot 10^8$
$ST$ (Ni-63)		0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
$ST$ (Fe-55)		0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
$ST$ (Cs-137)		0	$3,4 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	0	$3,7 \cdot 10^6$	<b><math>4,0 \cdot 10^8</math></b>	$1,1 \cdot 10^8$
$ST$ (Sr-90)		0	$8,5 \cdot 10^4$	$5,6 \cdot 10^4$	0	$9,2 \cdot 10^4$	<b><math>9,8 \cdot 10^6</math></b>	$2,8 \cdot 10^6$
$ST$ (Am-241)		0	$1,2 \cdot 10^5$	$7,7 \cdot 10^4$	0	$1,3 \cdot 10^5$	<b><math>1,3 \cdot 10^7</math></b>	$3,9 \cdot 10^6$
$ST$ (Gesamt)		0	$1,2 \cdot 10^7$	$7,7 \cdot 10^6$	0	$1,3 \cdot 10^7$	<b><math>1,3 \cdot 10^9</math></b>	$3,9 \cdot 10^8$
$ST$ (Co-60)	$> 10 \mu m$	0	0	0	0	$1,7 \cdot 10^7$	<b><math>1,8 \cdot 10^9</math></b>	$1,2 \cdot 10^9$
$ST$ (Ni-63)		0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
$ST$ (Fe-55)		0	0	0	0	0	<b>0</b>	0
$ST$ (Cs-137)		0	0	0	0	$7,4 \cdot 10^6$	<b><math>7,9 \cdot 10^8</math></b>	$5,3 \cdot 10^8$
$ST$ (Sr-90)		0	0	0	0	$1,8 \cdot 10^5$	<b><math>2,0 \cdot 10^7</math></b>	$1,3 \cdot 10^7$
$ST$ (Am-241)		0	0	0	0	$2,5 \cdot 10^5$	<b><math>2,7 \cdot 10^7</math></b>	$1,8 \cdot 10^7$
$ST$ (Gesamt)		0	0	0	0	$2,5 \cdot 10^7$	<b><math>2,7 \cdot 10^9</math></b>	$1,8 \cdot 10^9$

a) luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)

b) Beinhaltet auch KC IV mit VKZ

Die größten potentiell freigesetzten Aktivitäten ergeben sich für KC II – V der APG 01 – 02. Diese werden bei den im Folgenden beschriebenen Ausbreitungs- und Dosisberechnungen als abdeckende

Werte für die potentielle Freisetzung beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand verwendet.

Die potentiell freigesetzten Aktivitäten werden als Aerosole der Größenklasse 2 ( $AED \leq 10 \mu\text{m}$ ) bzw. Größenklasse U ( $AED > 10 \mu\text{m}$ ) (siehe Abschnitt 2.2.2) bzw. betrachtet.

#### 4.2.2. Bestimmung des 95 %-Quantils für die potentielle Exposition

Die Maximalwerte für Ausbreitungsfaktoren in den einzelnen Betrachtungsbereichen wurden wie in Abschnitt 3.4 beschrieben bestimmt. Dabei wurde keine thermische Überhöhung verwendet, die Freisetzungshöhe wurde mit 16 m angesetzt. Unter Verwendung des Quellterms aus Abschnitt 4.2.1.2 wurden aus den Ausbreitungsfaktoren die potentiellen Maximalwerte für die 7-Tages-Folgedosis und die 1-Jahres-Folgedosis für die einzelnen Wettersituationen berechnet. Bei der Bestimmung der Dosis wurde an Orten mit Wohnbebauung ein Daueraufenthalt (168 h für die 7-Tage-Folgedosis und 8760 h für die 1-Jahres-Folgedosis) unterstellt. Für Arbeitsstätten wurde ein Aufenthalt von 40 h für die 7-Tage-Folgedosis und 2000 h für die 1-Jahres-Folgedosis verwendet.

Für die jeweilige Wettersituation wurde dann der resultierende maximale Dosiswert ausgewählt. Aus diesen maximalen Werten wurde die Dosis bestimmt, die 95 % der Fälle abdeckt. Die resultierende Verteilung der kumulierten Häufigkeit, also die Häufigkeit einer effektiven Dosis  $\leq D$ , ist in Abbildung 4-2 mit der durchgezogenen blauen Linie für die 1-Jahres-Folgedosis in der Altersgruppe der Säuglinge an Orten mit Wohnbebauung dargestellt. Das 95 %-Quantil ist mit roten Linien markiert.

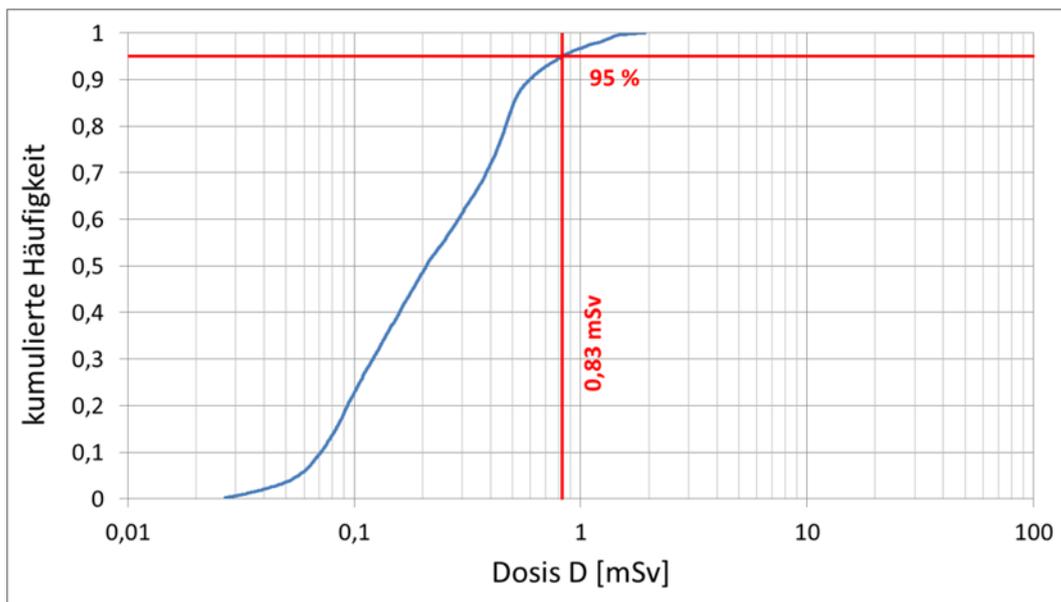


Abbildung 4-2: Histogramm der kumulierten Häufigkeit für die 1-Jahres-Folgedosis (Säuglinge) an Orten mit Wohnbebauung (Häufigkeit für effektive Dosis kleiner als  $D$ ) mit Markierung für das 95 %-Quantil

Die resultierenden Werte für das 95 %-Quantil sind in Tabelle 4-4 für Orte mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten angegeben.

Tabelle 4-4: Werte für das 95 %-Quantil der potentiellen Folgedosis an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten für den Flugzeugabsturz ohne Folgebrand

Altersgruppe	Dosis Wohnbebauung [mSv] (95 %-Quantil)		Dosis Arbeitsstätte [mSv] (95 %-Quantil)	
	7 d-Folgedosis	1 a-Folgedosis	40 h	2000 h
≤ 1 a	0,038	<b>0,83</b>	0,025	0,21
1 – 2 a	0,052	0,79	0,040	<b>0,22</b>
2 – 7 a	0,056	0,69	0,046	0,20
7 – 12 a	0,073	0,66	0,064	0,20
12 – 17 a	0,081	0,62	0,074	0,20
> 17 a	<b>0,095</b>	0,59	<b>0,088</b>	0,20

#### **4.2.3. Dosis an der Grenze des Staatsgebiets**

Die Ausbreitungsberechnungen werden mit einem Gauß-Fahnenmodell mit den in Abschnitt 2.2 und 3.2 angegebenen Parametern durchgeführt. Für den Fall ohne Folgebrand wird keine thermische Überhöhung verwendet.

Tabelle 4-5 zeigt die Werte der potentiellen Effektivdosis an der Grenze des Staatsgebiets. Der größere Anteil der Dosis wird sowohl für den Betrachtungszeitraum 7 Tage als auch für den Betrachtungszeitraum 1 Jahr vom Expositionspfad  $\gamma$ -Bodenstrahlung verursacht. Die am höchsten belastete Altersgruppe ist die Altersgruppe der Säuglinge ( $\leq 1$  a) mit einer effektiven Dosis aus äußerer Bestrahlung und Inhalation von 0,00007 mSv für den Betrachtungszeitraum von 7 Tagen bzw. 0,003 mSv für den Betrachtungszeitraum von 1 Jahr.

Tabelle 4-5: Potentielle effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand

Alter	Betrach- tungs- zeitraum	γ-Bodenstrahlung		β-/γ-Submersion + Inhalation		Äuß. Bestr. + Inhalation
		Entf. [km]	Dosis [mSv]	Entf. [km]	Dosis [mSv]	Dosis [mSv]
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	7 Tage	150	$6,5 \cdot 10^{-5}$	150	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)			$6,1 \cdot 10^{-5}$		$3,5 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			$5,3 \cdot 10^{-5}$		$3,9 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$
Schulkinder (7-12 Jahre)			$4,9 \cdot 10^{-5}$		$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
Jugendliche (12-17 Jahre)			$4,4 \cdot 10^{-5}$		$6,8 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$
Erwachsene (> 17 Jahre)			$4,0 \cdot 10^{-5}$		$8,0 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	1 Jahr	150	$3,2 \cdot 10^{-3}$	150	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)			$3,0 \cdot 10^{-3}$		$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			$2,6 \cdot 10^{-3}$		$3,9 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Schulkinder (7-12 Jahre)			$2,4 \cdot 10^{-3}$		$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Jugendliche (12-17 Jahre)			$2,2 \cdot 10^{-3}$		$6,8 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Erwachsene (> 17 Jahre)			$2,0 \cdot 10^{-3}$		$8,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$

In Tabelle 4-6 sind die Beiträge der einzelnen Nuklide zur Effektivdosis (Summe aus äußerer Bestrahlung und Inhalation) an der Grenze des Staatsgebiets für den Flugzeugabsturz ohne Folgebrand aufgeführt.

Im Betrachtungszeitraum 7 Tage trägt für die Altersgruppe der Säuglinge (≤ 1 a) Co-60 ca. 87 % und Cs-137 ca. 10 % bei. Der Beitrag durch die restlichen Nuklide beläuft sich auf etwa 3 % (hauptsächlich Am-241). Für die Erwachsenen (> 17 a) trägt Am-241 zu ca. 16 % bei. Für den Betrachtungszeitraum 1 Jahr liefert Co-60 mit ca. 89 % als Mittelwert über alle Altersklassen den größten Anteil an der potentiellen Effektivdosis. Der Beitrag durch die restlichen Nuklide beläuft sich auf etwa 11 % (hauptsächlich Cs-137). Hier liefert die potentielle Exposition durch γ-Bodenstrahlung den Hauptbeitrag zur Dosisbelastung.

Tabelle 4-6: Beiträge der Nuklide zur potentiellen effektiven Dosis in mSv an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand

Alter	Betrachtungszeitraum	Effektive Dosis [mSv]				
		Co-60	Cs-137	Sr-90	Am-241	Summe
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	7 Tage	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)		$5,5 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		$4,7 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$
Schulkinder (7-12 Jahre)		$4,4 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
Jugendliche (12-17 Jahre)		$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$3,7 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	1 Jahr	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)		$2,7 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Schulkinder (7-12 Jahre)		$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Jugendliche (12-17 Jahre)		$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-9}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$

### 4.3. Absturz eines Militärflugzeuges mit Folgebrand

#### 4.3.1. Quelltermmittlung

##### 4.3.1.1. Betroffenes Inventar

Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass der betroffene Teil der Aktivität sowohl thermischen als auch mechanischen Belastungen ausgesetzt ist.

Wie in Abschnitt 2.1.2 angegeben, wird davon ausgegangen, dass je nach Gebindemasse insgesamt 28 bzw. 56 Gebinde sowohl mechanisch als auch thermisch belastet sind, weitere 122 bzw. 94 Gebinde sind nur thermisch belastet. Im Folgenden wird die betroffene und freigesetzte Aktivität in Abhängigkeit vom Typ der Gebinde und des Abfalls bestimmt. Die Dosisberechnung wird für den Typ von Gebinden und Abfällen durchgeführt, der zu den höchsten potentiell freigesetzten Aktivitäten führt.

Zur Abschätzung der betroffenen Aktivität wird vom Aktivitätsinventar pro Gebinde nach Tabelle 3-6 ausgegangen. In Abhängigkeit vom Typ ergeben sich die in Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8 angegebenen potentiell betroffenen nuklidspezifischen Aktivitäten.

Tabelle 4-7: Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeuges mit Folgebrand im LasmAaZ thermisch und mechanisch betroffene Aktivitäten (BK 8)

Anzahl und Typ	NV	APG / Abfalltyp	AGG	betroffene Aktivität [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
56 Behälter Typ II	A	APG 03	AGG 8	$1,3 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	0	0	0
	K			$2,7 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	$3,9 \cdot 10^{12}$
56 Behälter Typ II	K	APG 01 – 05	AGG 8	$1,8 \cdot 10^{14}$	0	0	$7,6 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{12}$	$2,6 \cdot 10^{12}$
28 KC II	A	APG 03	AGG 3	$1,3 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	0	0	0
	K			$2,9 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,2 \cdot 10^{12}$	$3,1 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^{10}$
28 KC II-V <sup>a)</sup>	K	APG 01 – 02	AGG 2	$3,1 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,3 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^{10}$
28 KC II-V	K	APG 03 – 05	AGG 5	$8,9 \cdot 10^{13}$	0	0	$3,8 \cdot 10^{13}$	$9,4 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{12}$

<sup>a)</sup> Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

Tabelle 4-8: Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ nur thermisch betroffene Aktivitäten (BK 2)

Anzahl und Typ	NV	APG / Abfalltyp	AGG	betroffene Aktivität [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
94 Behälter Typ II	A	APG 03	AGG 8	$2,1 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{16}$	0	0	0
	K			$4,3 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,8 \cdot 10^{14}$	$4,5 \cdot 10^{12}$	$6,2 \cdot 10^{12}$
94 Behälter Typ II	K	APG 01 – 05	AGG 8	$6,5 \cdot 10^{13}$	0	0	$2,8 \cdot 10^{13}$	$6,9 \cdot 10^{11}$	$9,4 \cdot 10^{11}$
122 KC II	A	APG 03	AGG 3	$5,6 \cdot 10^{13}$	$5,4 \cdot 10^{13}$	$5,4 \cdot 10^{13}$	0	0	0
	K			$1,3 \cdot 10^{13}$	0	0	$5,4 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{11}$
122 KC II-V <sup>a)</sup>	K	APG 01 – 02	AGG 2	$1,3 \cdot 10^{13}$	0	0	$5,8 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{11}$
122 KC II-V	K	APG 03 – 05	AGG 5	$3,1 \cdot 10^{13}$	0	0	$1,3 \cdot 10^{13}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^{11}$

<sup>a)</sup> Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

Bei den Betrachtungen wird vereinfachend nicht berücksichtigt, dass die Summe der betroffenen Aktivitäten in einem Behältertyp ggf. kleiner sein kann als die für das LasmAaZ vorgesehene Gesamtaktivität für diesen Behältertyp. Es stellt sich letztlich heraus, dass für die ungünstigsten betroffenen Behältertypen (siehe nächster Abschnitt) eine solche Überschreitung nicht vorliegt, diese aber fast ausgeschöpft ist. Das bedeutet, der hier verfolgte Ansatz geht konservativ davon aus, dass für den ungünstigsten betroffenen Behältertyp nahezu die gesamte für das LasmAaZ vorgesehene Aktivität sich in den mechanisch und thermisch betroffenen Behältern befindet.

#### 4.3.1.2. Freigesetzte Aktivität

Die Freisetzungssanteile aus den Behältern werden gemäß Abschnitt 3.3.4 den Gebinden zugeordnet. Es wird zwar davon ausgegangen, dass durch den Absturz „nur“ ein Loch in der Außenwand verursacht wird, konservativ wird allerdings keine Rückhaltewirkung durch das Gebäude unterstellt ( $LPF = 1$ ). Damit ergeben sich durch thermische und mechanische Belastungen (BK 8) die in Tabelle 4-9 angegebenen potentiell freigesetzten Aktivitäten. Die durch rein thermische Belastungen (BK 2) resultierenden potentiell freigesetzten Aktivitäten sind in Tabelle 4-10 aufgeführt.

Tabelle 4-9: Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ freigesetzte Aktivitäten (mechanische und thermische Belastung)

	AED	Behälter Typ II		Behälter Typ II	KC II		KC II - V <sup>d)</sup>	KC II - V
		APG 03		APG 01 - 05	APG 03		APG 01 - 02	APG 03 - 05
		A	K	K	A	K	K	K
		AGG 8	AGG 8	AGG 8	AGG 3	AGG 3	AGG 2	AGG 5
<b>Freisetzungsanteile (BK 8)</b>								
<i>ARF</i> <sup>a)</sup>	≤ 10 µm	0	2,2 <sup>o</sup> ·10 <sup>-4</sup> <sup>b)</sup>	2,2 <sup>o</sup> ·10 <sup>-4</sup> <sup>b)</sup>	0	3,0 <sup>o</sup> ·10 <sup>-4</sup> <sup>c)</sup>	0,3 <sup>c)</sup>	0,02 <sup>b)</sup>
	> 10 µm	0	0	0	0	6,0 <sup>o</sup> ·10 <sup>-6</sup>	6,0 <sup>o</sup> ·10 <sup>-4</sup>	1,4 <sup>o</sup> ·10 <sup>-5</sup>
<b>Faktor für Gebäuderückhaltung</b>								
<i>LPF</i>	≤ 10 µm	1						
	> 10 µm	1						
<b>potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]</b>								
<i>ST</i> (Co-60)	≤ 10 µm	0	5,8 · 10 <sup>9</sup>	3,9 · 10 <sup>9</sup>	0	5,8 · 10 <sup>7</sup>	3,1 · 10 <sup>10</sup>	<b>8,9 · 10<sup>10</sup></b>
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	2,5 · 10 <sup>10</sup>	1,7 · 10 <sup>10</sup>	0	3,7 · 10 <sup>8</sup>	4,0 · 10 <sup>11</sup>	<b>7,6 · 10<sup>11</sup></b>
<i>ST</i> (Sr-90)		0	6,2 · 10 <sup>7</sup>	4,1 · 10 <sup>7</sup>	0	6,1 · 10 <sup>5</sup>	3,3 · 10 <sup>8</sup>	<b>9,4 · 10<sup>8</sup></b>
<i>ST</i> (Am-241)		0	8,5 · 10 <sup>7</sup>	5,7 · 10 <sup>7</sup>	0	4,0 · 10 <sup>5</sup>	1,3 · 10 <sup>7</sup>	<b>2,6 · 10<sup>7</sup></b>
<i>ST</i> (Gesamt)		0	3,1 · 10 <sup>10</sup>	2,1 · 10 <sup>10</sup>	0	4,3 · 10 <sup>8</sup>	4,3 · 10 <sup>11</sup>	<b>8,5 · 10<sup>11</sup></b>
<i>ST</i> (Co-60)	> 10 µm	0	0	0	0	1,7 · 10 <sup>7</sup>	<b>1,8 · 10<sup>9</sup></b>	1,2 · 10 <sup>9</sup>
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	0	0	0	7,4 · 10 <sup>6</sup>	<b>7,9 · 10<sup>8</sup></b>	5,3 · 10 <sup>8</sup>
<i>ST</i> (Sr-90)		0	0	0	0	1,8 · 10 <sup>5</sup>	<b>2,0 · 10<sup>7</sup></b>	1,3 · 10 <sup>7</sup>
<i>ST</i> (Am-241)		0	0	0	0	2,5 · 10 <sup>5</sup>	<b>2,7 · 10<sup>7</sup></b>	1,8 · 10 <sup>7</sup>
<i>ST</i> (Gesamt)		0	0	0	0	2,5 · 10 <sup>7</sup>	<b>2,7 · 10<sup>9</sup></b>	1,8 · 10 <sup>9</sup>

a) luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)

b) Wert für Cs-137, die anderen Nuklide wurden mit einem Faktor 0,1 korrigiert

c) Wert für Cs-137, die anderen Nuklide gemäß [SER 10]

d) Beinhaltet auch KC IV mit VKZ

Tabelle 4-10: Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmAaZ freigesetzte Aktivitäten (thermische Belastung)

	AED	Behälter Typ II		Behälter Typ II	KC II		KC II – V <sup>d)</sup>	KC II – V
		APG 03		APG 01 – 05	APG 03		APG 01 – 02	APG 03 – 05
		A	K	K	A	K	K	K
		AGG 8	AGG 8	AGG 8	AGG 3	AGG 3	AGG 2	AGG 5
<b>Freisetzungsanteile (BK 2)</b>								
<i>ARF</i> <sup>a)</sup>	≤ 10 µm	0	1,1 <sup>o</sup> ·10 <sup>-7 b)</sup>	1,1 <sup>o</sup> ·10 <sup>-7 b)</sup>	0	2,0 <sup>o</sup> ·10 <sup>-4 b)</sup>	1,2 <sup>o</sup> ·10 <sup>-3 b)</sup>	2,1 <sup>o</sup> ·10 <sup>-4 b)</sup>
	> 10 µm	0	0	0	0	1,0 <sup>o</sup> ·10 <sup>-7</sup>	1,0 <sup>o</sup> ·10 <sup>-5</sup>	2,7 <sup>o</sup> ·10 <sup>-7</sup>
<b>Faktor für Gebäuderückhaltung</b>								
<i>LPF</i>	≤ 10 µm	1						
	> 10 µm	1						
<b>potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]</b>								
<i>ST</i> (Co-60)	≤ 10 µm	0	4,7 · 10 <sup>6</sup>	7,1 · 10 <sup>5</sup>	0	2,5 · 10 <sup>8</sup>	<b>1,6 · 10<sup>9</sup></b>	6,5 · 10 <sup>8</sup>
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	2,0 · 10 <sup>7</sup>	3,0 · 10 <sup>6</sup>	0	1,1 · 10 <sup>9</sup>	<b>6,9 · 10<sup>9</sup></b>	2,8 · 10 <sup>9</sup>
<i>ST</i> (Sr-90)		0	5,0 · 10 <sup>4</sup>	7,5 · 10 <sup>3</sup>	0	2,7 · 10 <sup>6</sup>	<b>1,7 · 10<sup>7</sup></b>	6,9 · 10 <sup>6</sup>
<i>ST</i> (Am-241)		0	6,8 · 10 <sup>4</sup>	1,0 · 10 <sup>4</sup>	0	3,7 · 10 <sup>6</sup>	<b>2,3 · 10<sup>7</sup></b>	9,5 · 10 <sup>6</sup>
<i>ST</i> (Gesamt)		0	2,5 · 10 <sup>7</sup>	3,8 · 10 <sup>6</sup>	0	1,3 · 10 <sup>9</sup>	<b>8,6 · 10<sup>9</sup></b>	3,5 · 10 <sup>9</sup>
<i>ST</i> (Co-60)	> 10 µm	0	0	0	0	1,3 · 10 <sup>6</sup>	<b>1,3 · 10<sup>8</sup></b>	8,4 · 10 <sup>6</sup>
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	0	0	0	5,4 · 10 <sup>5</sup>	<b>5,8 · 10<sup>7</sup></b>	3,6 · 10 <sup>6</sup>
<i>ST</i> (Sr-90)		0	0	0	0	1,3 · 10 <sup>4</sup>	<b>1,4 · 10<sup>6</sup></b>	8,9 · 10 <sup>4</sup>
<i>ST</i> (Am-241)		0	0	0	0	1,8 · 10 <sup>4</sup>	<b>2,0 · 10<sup>6</sup></b>	1,2 · 10 <sup>5</sup>
<i>ST</i> (Gesamt)		0	0	0	0	1,8 · 10 <sup>6</sup>	<b>2,0 · 10<sup>8</sup></b>	1,2 · 10 <sup>7</sup>

a) luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)

b) Wert für Cs-137, die anderen Nuklide wurden mit einem Faktor 0,1 korrigiert

c) Wert für Cs-137, die anderen Nuklide gemäß [SER 10]

d) Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

Die größten potentiell freigesetzten Aktivitäten ergeben sich in Abhängigkeit von der Partikelgröße und dem Nuklid für KC II – V der APG 01 – 02 oder KC II – V der APG 03 – 05. Es wurden Berechnungen für alle relevanten Kombinationen dieser Gebinde durchgeführt, dabei ergibt sich, dass Freisetzungen aus KC II – V der APG 01 – 02 mit BK 2 (nur thermische Belastung) und APG 03 – 05 mit BK 8 (thermische und mechanische Belastung) zur ungünstigsten potentiellen Exposition führen. Somit wird die Summe potentiell freigesetzter Aktivitäten aus Tabelle 4-9 für KC II – V der APG 03 - 05 und aus Tabelle 4-10 für KC II – V der APG 01 – 02 bei den im Folgenden beschrie-

benen Ausbreitungs- und Dosisberechnungen als abdeckender Wert für die potentielle Freisetzung beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrenn verwendet.

Die potentiell freigesetzten Aktivitäten werden als Aerosole der Größenklasse 2 ( $AED \leq 10 \mu\text{m}$ ) bzw. Größenklasse U ( $AED > 10 \mu\text{m}$ ) (siehe Abschnitt 2.2.2) bzw. betrachtet.

#### 4.3.2. Bestimmung des 95 %-Quantils für die potentielle Exposition

Die Maximalwerte für Ausbreitungsfaktoren in den einzelnen Betrachtungsbereichen wurden wie in Abschnitt 3.4 beschrieben bestimmt. Unter Verwendung des Quellterms aus Abschnitt 4.3.1.2 wurden aus den Ausbreitungsfaktoren die potentiellen Maximalwerte für die 7-Tages-Folgedosis und die 1-Jahres-Folgedosis für die einzelnen Wettersituationen berechnet. Bei der Bestimmung der Dosis wurde an Orten mit Wohnbebauung ein Daueraufenthalt (168 h für die 7-Tage-Folgedosis und 8760 h für die 1-Jahres-Folgedosis) unterstellt. Für Arbeitsstätten wurde ein Aufenthalt von 40 h für die 7-Tage-Folgedosis und 2000 h für die 1-Jahres-Folgedosis verwendet.

Für die jeweilige Wettersituation wurde dann der resultierende maximale Dosiswert ausgewählt. Aus diesen maximalen Werten wurde die Dosis bestimmt, die 95 % der Fälle abdeckt. Die resultierende Verteilung der kumulierten Häufigkeit, also die Häufigkeit einer effektiven Dosis  $\leq D$ , ist in Abbildung 4-2 mit der durchgezogenen blauen Linie dargestellt. Das 95 %-Quantil ist mit roten Linien markiert.

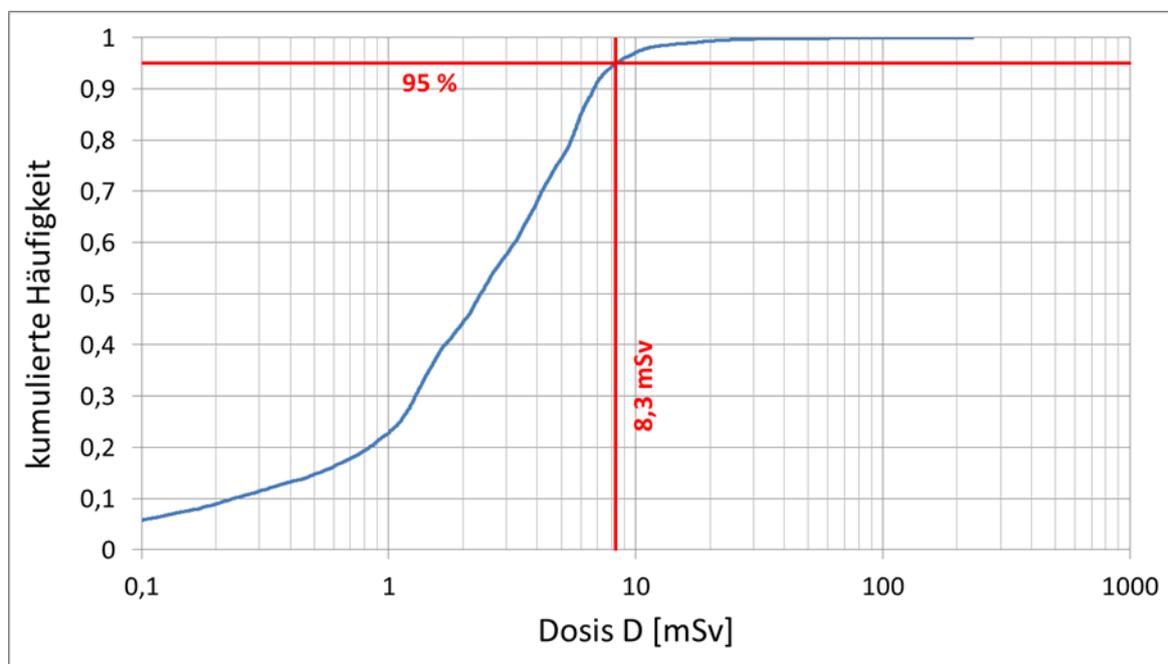


Abbildung 4-3: Histogramm der kumulierten Häufigkeit für die 1-Jahres-Folgedosis (Säuglinge) an Orten mit Wohnbebauung (Häufigkeit für effektive Dosis kleiner als  $D$ ) mit Markierung für das 95 %-Quantil (Freisetzung aus Gebinden der APG 01 – 02)

Die resultierenden Werte für das 95 %-Quantil sind in Tabelle 4-4 für Orte mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten angegeben.

Tabelle 4-11: Werte für das 95 %-Quantil der potentiellen Folgedosis an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten für den Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand

Altersgruppe	Dosis Wohnbebauung [mSv] (95 %-Quantil)		Dosis Arbeitsstätte [mSv] (95 %-Quantil)	
	7 d-Folgedosis	1 a-Folgedosis	40 h	2000 h
≤ 1 a	0,26	<b>8,3</b>	0,14	<b>2,0</b>
1 – 2 a	0,31	7,9	0,20	<b>2,0</b>
2 – 7 a	0,32	6,9	0,23	1,8
7 – 12 a	0,35	6,5	0,26	1,7
12 – 17 a	0,37	5,7	0,29	1,5
> 17 a	<b>0,38</b>	5,2	<b>0,31</b>	1,4

#### **4.3.3. Dosis an der Grenze des Staatsgebiets**

Die Ausbreitungsberechnungen werden mit einem Gauß-Fahnenmodell mit den in Abschnitt 2.2 und 3.2 angegebenen Parametern durchgeführt. Die höchste potentielle Exposition ergibt sich dabei durch Freisetzungen aus Gebinden der APG 01 – 02.

Tabelle 4-12 zeigt die Werte der potentiellen Effektivdosis an der Grenze des Staatsgebiets. Der größere Anteil der Dosis wird sowohl für den Betrachtungszeitraum 7 Tage als auch für den Betrachtungszeitraum 1 Jahr vom Expositionspfad  $\gamma$ -Bodenstrahlung verursacht. Die am höchsten belastete Altersgruppe ist die Altersgruppe der Säuglinge ( $\leq 1$  a) mit einer effektiven Dosis aus äußerer Bestrahlung und Inhalation von 0,002 mSv für den Betrachtungszeitraum von 7 Tagen bzw. 0,096 mSv für den Betrachtungszeitraum von 1 Jahr.

Tabelle 4-12: Potentielle effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand

Alter	Betrach- tungs- zeitraum	$\gamma$ -Bodenstrahlung		$\beta$ -/ $\gamma$ -Submersion + Inhalation		Äuß. Bestr. + Inhalation
		Entf. [km]	Dosis [mSv]	Entf. [km]	Dosis [mSv]	Dosis [mSv]
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	7 Tage	150	$1,9 \cdot 10^{-3}$	150	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)			$1,8 \cdot 10^{-3}$		$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			$1,5 \cdot 10^{-3}$		$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Schulkinder (7-12 Jahre)			$1,4 \cdot 10^{-3}$		$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Jugendliche (12-17 Jahre)			$1,2 \cdot 10^{-3}$		$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)			$1,1 \cdot 10^{-3}$		$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	1 Jahr	150	$9,6 \cdot 10^{-2}$	150	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)			$9,0 \cdot 10^{-2}$		$1,4 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			$7,8 \cdot 10^{-2}$		$1,6 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$
Schulkinder (7-12 Jahre)			$7,3 \cdot 10^{-2}$		$2,0 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$
Jugendliche (12-17 Jahre)			$6,3 \cdot 10^{-2}$		$2,2 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)			$5,7 \cdot 10^{-2}$		$2,4 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$

In Tabelle 4-13 sind die Beiträge der einzelnen Nuklide zur Effektivdosis (Summe aus äußerer Bestrahlung und Inhalation an der Grenze des Staatsgebiets für den Flugzeugabsturz mit Folgebrand) aufgeführt.

Im Betrachtungszeitraum 7 Tage trägt Cs-137 im Mittel über alle Altersklassen zu etwa 68 % bei. Der Beitrag durch die restlichen Nuklide beläuft sich auf etwa 32 % (hauptsächlich Co-60). Der Hauptanteil der Dosisbelastung wird durch  $\gamma$ -Bodenstrahlung erzeugt. Für den Betrachtungszeitraum 1 Jahr liefert ebenfalls Cs-137 mit 68 % als Mittelwert über alle Altersklassen den größten Anteil an der potentiellen Effektivdosis. Co-60 liefert einen Anteil von etwa 32 %. Auch hier liefert die potentielle Exposition durch  $\gamma$ -Bodenstrahlung den Hauptbeitrag zur Dosisbelastung.

Die potentielle Exposition durch  $\gamma$ -Bodenstrahlung<sup>15</sup> wird ausschließlich durch die Nuklide Cs-137 und Co-60 verursacht.

<sup>15</sup> Anteile der einzelnen Nuklide über die verschiedenen Altersgruppen gemittelt

Tabelle 4-13: Beiträge der Nuklide zur potentiellen effektiven Dosis in mSv an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand

Alter	Betrachtungszeitraum	Effektive Dosis [mSv]				
		Co-60	Cs-137	Sr-90	Am-241	Summe
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	7 Tage	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)		$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		$5,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Schulkinder (7-12 Jahre)		$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Jugendliche (12-17 Jahre)		$4,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$4,1 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	1 Jahr	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$
Kleinkinder (1-2 Jahre)		$2,9 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		$2,5 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$
Schulkinder (7-12 Jahre)		$2,3 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$
Jugendliche (12-17 Jahre)		$2,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$

#### 4.4. Bewertung

Die im vorliegenden Bericht berechneten Dosiswerte für verschiedene Aufenthaltsdauern unterschreiten die Eingreifrichtwerte gemäß [SSK 03B]. Die höchsten Dosiswerte ergeben sich für den Fall des Absturzes eines Militärflugzeugs mit Folgebrand. Für die 7-Tage-Folgedosis sind die Erwachsenen ( $> 17$  a) beim Aufenthalt an der nächstgelegenen Wohnbebauung mit ca. 0,4 mSv die potentiell am höchsten belastete Altersgruppe. Bei Betrachtung der 1-Jahres-Folgedosis sind die Säuglinge ( $\leq 1$  a) mit 8,3 mSv die potentiell am höchsten belastete Altersgruppe.

Die höchsten potentiellen Dosiswerte an der Staatsgrenze ergeben sich für den Absturz mit Folgebrand. Hier sind die Säuglinge mit einer potentiellen Effektivdosis von  $2 \cdot 10^{-3}$  mSv (7-Tage-Folgedosis) bzw. 0,096 mSv (1-Jahr-Folgedosis) die potentiell am höchsten belastete Altersgruppe.

Für das Aktivitätsinventar der mechanisch und thermisch belasteten Gebinde wurde eine Vollausschöpfung der Summenformel der Einlagerungsbedingungen des Endlagers Konrad angenommen (Summenwert = 1). Da dies nur für maximal 1 % der im Endlager Konrad einzulagernden nicht störfallfesten Gebinde möglich ist, ist dieser Ansatz sehr konservativ. Somit sind real deutlich geringere potentielle Expositionen zu erwarten.

## **5. QUELLEN**

- [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
- [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)
- [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
- [BKG 15]      **BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE**  
Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m DGM200  
Geodaten der deutschen Landesvermessung, © GeoBasis-DE / BKG 2015
- [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 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

- [BMU 14] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT  
Bekanntmachung zu der „Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition in-  
folge von Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD) auf kerntechnische  
Anlagen und Einrichtungen (SEWD-Berechnungsgrundlage)“  
vom 28. Oktober 2014; GMBI. 2014, Nr. 64, S. 1315
- [BRI 69] BRIGGS, G. A.  
Plume rise.  
U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information. Springfield, Va.,  
Charringhouse 1969
- [BRI 71] BRIGGS, G. A.  
Some recent analyses of plume rise observation.  
Proc. 2nd Intenational Clean Air Congress, Washigton 1970. Academic Press 1971.
- [BRI 75] BRIGGS, G. A.  
Plume Rise Predictions,  
Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses, Workshop Proceedings,  
pp. 59 – 111 (American Meteorology Society, Boston, MA), Oct. 3, 1975
- [DIN 93] DIN EN 481  
Arbeitsplatzatmosphäre – Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetra-  
gener 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 Kon-  
ditionierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle  
Stellungnahme der Entsorgungskommission 11.07.2013
- [ESP 16] ESP PLANKONTOR GMBH  
Kernkraftwerk Krümmel  
Lageplan - Variante C.3  
Plan Nr.: EZY-VE-010  
14.04.2016

- [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 11] GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (GRS) MBH  
Bewertung der Abklinglagerung von Großkomponenten aus dem Rückbau kerntechnischer  
Anlagen in Deutschland  
Abschlussbericht, GRS-A-3626, September 2011
- [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
- [HOM 13] HOMANN, STEVEN G.; ALUZZI, FERNANDO  
HotSpot – Healt Physics Codes, Version 3.0, User’s Guide  
National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory,  
Livermore, CA 94550, LLNL-SM-636474, May 1, 2013
- [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
- [KUH 08] KUHR, CHRISTIAN  
„CFD-Simulation der dynamischen Eigenschaften großer Kerosin- und Heptan-  
Poolflammen“, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2008
- [MIT 02] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
“The Towers Lost And Beyond”, A collection of essays on the WTC by researchers at the  
Massachusetts Institute of Technology, edited by Eduardo Kausel

- [NEI 09] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE  
„Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs“,  
NEI 07-13, Rev. 07 Public Version, May 2009, Prepared by: ERIN Engineering & Research,  
Inc., 2001 N. Main Street, Suite 510, Walnut Creek, CA 94596
- [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
- [RIC 15] RICHTER, CORNELIA; SOGALLA, MARTIN, THIELEN, HARALD, MARTENS, REINHARD  
ARTM – Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit der graphischen Benutzer-  
oberfläche GO-ARTM – Programmbeschreibung zu Version 2.8.0 (GO-ARTM Version 2.0)  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, im Auftrag des Bundes-  
amtes für Strahlenschutz, Stand 17.04.2015
- [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
- [SSK 03B] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION  
Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechni-  
schen Notfällen, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 37 (Vorabdruck),  
2003
- [SSK 14] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION  
Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölke-  
rung bei Ereignissen mit Freisetzungen von Radionukliden  
Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 268. Sitzung der Strahlen-  
schutzkommission am 13./14. Februar 2014; BANz AT 18.11.2014 B

- [SSK 15] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION  
Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen  
Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 274. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 19./20. Februar 2015; BAnz AT 04.01.2016 B4
- [SSV 17] STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (STRLSCHV) IN DER FASSUNG VOM 20. JULI 2001  
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - 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)
- [TIE 95] TIESZEN, SHELDON R.  
„Fuel Dispersion Modeling for Aircraft-Runway impact Scenarios“  
Sandia Report SAND95-2529, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, November 1995
- [TIE 96] TIESZEN, SHELDON R.; ATTAWAY STEPHEN W.  
„Fuel Dispersion in High-Speed Aircraft/Soil Impact Scenarios“  
Sandia Report SAND96-0105, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, January 1996
- [VDI 85] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre  
Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung  
VDI 3782 Blatt 3  
Juni 1985
- [VDI 00] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle, Partikelmodell  
VDI 3945 Blatt 3, in der jeweils gültigen Fassung
- [VDI 09] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle  
Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen  
VDI 3782 Blatt 1  
August 2009



[VDI 15] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
Umweltmeteorologie – Übertragbarkeitsprüfung meteorologischer Daten zur Anwendung im  
Rahmen der TA Luft  
VDI 3783 Blatt 20, in der jeweils gültigen Fassung

## 6. ANHANG

### 6.1. Berechnung der effektiven Freisetzungsteile für Geschwindigkeiten größer als in der Transportstudie Konrad

Für die bei einem Flugzeugabsturz auftretenden hohen Geschwindigkeiten können die Freisetzungsteile aus der Transportstudie Konrad ([GRS 09] bzw. [GRS 17]) nicht direkt verwendet werden, da dort nur Geschwindigkeiten der Gebinde bis 110 km/h (für BK 7) berücksichtigt werden. Höhere Geschwindigkeiten können über verschiedene Methoden berücksichtigt werden:

1. Skalierung der Freisetzungsteile mit dem Energieeintrag

Die Freisetzungsteile  $ARF_K$  der Transportstudie Konrad gelten für Gebinde einer Masse  $M_K$ , die mit der Geschwindigkeit  $v_K$  aufprallen. Der Energieeintrag beträgt daher

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot M_K \cdot v_K^2$$

Beim Aufprall eines Objektes (z. B. des Flugzeug inklusive Beton) mit der Masse  $M$  und der Geschwindigkeit  $v$  auf das Gebinde beträgt der Energieeintrag

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2$$

Somit ergibt sich der über den Energieeintrag skalierte effektive Freisetzungsteil zu

$$ARF = ARF_K \cdot \frac{E}{E_K} = ARF_K \cdot \frac{M \cdot v^2}{M_K \cdot v_K^2}$$

Wenn mehr als ein Gebinde getroffen wird, muss natürlich berücksichtigt werden, dass pro Gebinde nicht die gesamte eingetragene Energie zur Verfügung steht.

2. Berechnung der Anzahl der betroffenen Gebinde über den Energieeintrag

Hier werden die Freisetzungsteile aus der Transportstudie Konrad direkt verwendet. Der Energieeintrag wird dazu benutzt, die Anzahl der betroffenen Gebinde zu berechnen, für die genug Energie zur Verfügung steht, um in die entsprechende Belastungsklasse zur Geschwindigkeit  $v_K$  aus der Transportstudie Konrad zu fallen. Die Anzahl berechnet sich dann zu

$$n = \frac{E}{E_K} = \frac{M \cdot v^2}{M_K \cdot v_K^2}$$

Das Produkt aus Freisetzungsteil  $ARF_K$  aus der Transportstudie Konrad und Anzahl der betroffenen Gebinde  $n$  kann als effektiver Freisetzungsteil (auf ein Gebinde bezogen)  $ARF_{\text{eff}}$  angesehen werden. Dieser ergibt sich zu

$$ARF_{\text{eff}} = ARF_K \cdot n = ARF_K \cdot \frac{E}{E_K} = ARF_K \cdot \frac{M \cdot v^2}{M_K \cdot v_K^2}$$

Dies entspricht dem Freisetzungsteil aus der direkten Skalierung der Freisetzungsteile. Daher sind die beiden Methoden als äquivalent anzusehen.

Die Verwendung der zweiten Methode mit der Berechnung der Anzahl der betroffenen Gebinde ist allgemeiner einsetzbar, da hier auch Kombinationen aus verschiedenen Gebinden relativ einfach umsetzbar sind.