



Endbericht

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

Dok.-Nr.: LAB/010/045

BS-Projekt-Nr. 1401-01
Bestellung Nr. EA3-4502837352

erstellt im Auftrag der
Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH & Co. oHG
Otto-Hahn-Straße
25541 Brunsbüttel

durch die
Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Rev. C, 20.09.2017

Anmerkung:

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



AUTOREN

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:



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

ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE

erstellt	geprüft	freigegeben
Projektleiter	Geschäftsbereichsleiter	Geschäftsführung

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

1. AUFGABENSTELLUNG	1
2. BERECHNUNGS- UND BEWERTUNGSGRUNDLAGEN	1
2.1. Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung	2
2.1.1. Freisetzungssanteile	3
2.1.1.1. Freisetzungssanteile nach Transportstudie Konrad	3
2.1.1.2. Freisetzungssanteile nach NDA	6
2.1.1.3. Nutzung der Freisetzungssanteile in diesem Bericht	8
2.1.2. Absturzscenario	9
2.1.2.1. Mechanische Belastungen	9
2.1.2.2. Thermische Belastungen	11
2.2. Ausbreitungsmodell	13
2.2.1. Meteorologische Daten	13
2.2.2. Ablagerungsfaktoren	14
2.2.3. Gebäudeeinfluss	14
2.2.4. Geländeeinfluss	15
2.2.5. Quellüberhöhung	15
2.2.6. Gauß-Fahnenmodell für die Dosis an der Staatsgrenze	16
2.3. Dosisberechnung	17
2.3.1. Expositionspfade	18
2.3.2. Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen	18
2.3.2.1. Atemraten	18
2.3.2.2. Expositionszeiten bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen	18
2.3.3. Dosiskoeffizienten	19
2.4. Bewertungsmaßstab für auslegungsüberschreitende Ereignisse	20
2.4.1. Eingreifrichtwerte für die Dosis	20
2.4.2. Ungünstigste Aufpunkte	21
3. STANDORTGEGEBENHEITEN	21
3.1. Lage und Gebäude	21
3.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigste Aufpunkte	24
3.3. Aktivitätsinventar	27
3.3.1. Berücksichtigte Aktivitäten	27
3.3.2. Nuklidvektor für Aktivierung	30
3.3.3. Nuklidvektor für Kontamination	31
3.3.4. Zuordnung der Freisetzungssanteile zu den Gebinden	32



3.4. Meteorologische Daten	33
3.5. Bemerkungen zur Methodik bei der probabilistischen Ausbreitungsrechnung.....	39
4. DOSISBERECHNUNGEN	41
4.1. Ausbreitungsberechnungen	41
4.1.1. Bestimmung der effektiven Emissionshöhe.....	41
4.1.2. Rechengitter	42
4.2. Absturz eines Militärflugzeuges ohne Folgebrand	43
4.2.1. Quelltermmittlung	43
4.2.1.1. Betroffenes Inventar	43
4.2.1.2. Freigesetzte Aktivität.....	44
4.2.2. Bestimmung des 95 %-Quantils für die potentielle Exposition.....	46
4.2.3. Dosis an der Grenze des Staatsgebiets.....	47
4.3. Absturz eines Militärflugzeuges mit Folgebrand.....	49
4.3.1. Quelltermmittlung	49
4.3.1.1. Betroffenes Inventar	49
4.3.1.2. Freigesetzte Aktivität.....	50
4.3.2. Bestimmung des 95 %-Quantils für die potentielle Exposition.....	53
4.3.3. Dosis an der Grenze des Staatsgebiets.....	55
4.4. Bewertung.....	56
5. QUELLEN	57

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite:
Tabelle 2-1:	Abfallgebindegruppen nach [GRS 09] 3
Tabelle 2-2:	Zuordnung zwischen Abfallproduktgruppe (APG) nach [BFS 10] und Abfallgebindegruppe (AGG) nach [GRS 09] 3
Tabelle 2-3:	Belastungsklassen für rein mechanische Beschädigungen in der Transportstudie Konrad [GRS 09] mit Angabe der Absturzhöhe eines Gebindes, die der Geschwindigkeit entspricht 4
Tabelle 2-4:	Partikelgrößenabhängige Freisetzungsteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe aus [GRS 09] 5
Tabelle 2-5:	Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], hier relevante Gruppen und Elemente sind fett dargestellt 6
Tabelle 2-6:	Temperaturabhängige Freisetzungsfaktoren für exemplarische Abfallarten und Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], keine Gebinderückhaltung 7
Tabelle 2-7:	Freisetzungsteile nach [SER 10] für die betrachteten Gebindearten und die hier relevanten Flüchtigkeitsgruppen 8
Tabelle 2-8:	Parameter und Berechnungsgrößen für den Aufprall eines Flugzeugs auf das Lasma 11
Tabelle 2-9:	Washoutkoeffizienten, Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten nach [BMU 14], basierend auf [BMU 07] 14
Tabelle 2-10:	Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [BMU 14] (basierend auf [SSK 03] für das Emissionszeitintervall 0 – 8 Stunden) 18
Tabelle 2-11:	Unterstellte Aufenthaltszeiten für Bereiche mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten 19
Tabelle 2-12:	Eingreifrichtwerte bezüglich effektiver Dosis für bestimmte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationszeiten und Expositionspfade nach [SSK 03B] (Auszug) 20
Tabelle 3-1:	Entfernungen der Aufpunkte bei probabilistischer Ausbreitungsrechnung unter Verwendung meteorologischer Daten zur Abschätzung der Expositionen an der Staatsgrenze 26
Tabelle 3-2:	Zur Einlagerung im Lasma vorgesehene Container-Typen nach [NUK 15] sowie Zuordnung zur Verteilung des Abfalltyps auf die Container 27
Tabelle 3-3:	Zulässige Einzelaktivitäten in den Gebindetypen sowie Zuordnung von ABK und APG bzw. Abfalltyp laut Annahmebedingungen für das Lasma. Die angegebenen AGG wurden gemäß Tabelle 2-2 zugeordnet. Die bei einem

	Störfall radiologisch nicht relevanten Nuklide H-3 und C-14 sind der Übersichtlichkeit wegen nicht aufgeführt.	28
Tabelle 3-4:	Verteilung des gesamten Aktivitätsinventars auf die Gebinde	29
Tabelle 3-5:	Verwendetes maximales Nuklidinventar pro Gebinde. Die bei Betrachtung eines auslegungüberschreitenden Ereignisses radiologisch wenig relevanten Nuklide H-3 und C-14 sind zur Übersichtlichkeit weggelassen.	29
Tabelle 3-6:	Nuklidvektor A für Aktivierung.....	31
Tabelle 3-7:	Nuklidvektor K für Kontamination	32
Tabelle 3-8:	Bei der Bestimmung der Quellterme verwendete Freisetzungsteile (mechanische Belastung).....	33
Tabelle 3-9:	Bei der Bestimmung der Quellterme verwendete Freisetzungsteile (thermische und mechanische Belastung)	33
Tabelle 3-10:	Windgeschwindigkeitsklassen für die probabilistische Ausbreitungsberechnung	34
Tabelle 3-11:	Niederschlagsklassen für die probabilistische Ausbreitungsberechnung.....	37
Tabelle 4-1:	Bei den ARTM-Ausbreitungsrechnungen verwendete Rechengitter.....	43
Tabelle 4-2:	Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand im LasmaA betroffene Aktivitäten	44
Tabelle 4-3:	Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand im LasmaA freigesetzte Aktivitäten	45
Tabelle 4-4:	Werte für das 95 %-Quantil der potentiellen Folgedosis an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten für den Flugzeugabsturz ohne Folgebrand	47
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.....	48
Tabelle 4-6:	Beiträge der Nuklide zur potentiellen effektiven Dosis in mSv an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand	49
Tabelle 4-7:	Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmaA thermisch und mechanisch betroffene Aktivitäten (BK 8).....	50
Tabelle 4-8:	Potentiell vom Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmaA nur thermisch betroffenen Aktivitäten (BK 2).....	50
Tabelle 4-9:	Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmaA freigesetzte Aktivitäten (mechanische und thermische Belastung).....	51
Tabelle 4-10:	Potentiell beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand im LasmaA freigesetzte Aktivitäten (thermische Belastung)	52

Tabelle 4-11:	Werte für das 95 %-Quantil der potentiellen Folgedosis an Orten mit Wohnbebauung und Arbeitsstätten für den Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand.....	54
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.....	55
Tabelle 4-13:	Beiträge der Nuklide zur potentiellen effektiven Dosis in mSv an der Grenze des Staatsgebiets beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand.....	56

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite:	
Abbildung 3-1:	Kernkraftwerk Brunsbüttel, Fotografie des Kraftwerks von Südwest nach Nordost [VAT 12]	22
Abbildung 3-2:	KKB-Gelände mit Massivzaun (blau), Aufpunkten (rot) und auf das geplante Lasma bezogene Sektoreneinteilung (Karte erstellt auf Basis digitaler topografischer Karten DTK5, Quelle © GeoBasis-DE/LVermGeo SH, www.LVermGeoSH.schleswig-holstein.de)	23
Abbildung 3-3:	Lage des Lasma im Bezug zu den Grenzen des deutschen Staatsgebiets mit Sektoreinteilung und Angabe der Entfernungen in km (erstellt auf Basis von Google Earth TM Pro Kartenservice Material)	24
Abbildung 3-4:	Karte der Umgebung (erstellt auf Basis digitaler topografischer Karten DTK5, Quelle © GeoBasis-DE/LVermGeo SH, www.LVermGeoSH.schleswig-holstein.de , sowie in den Außenbereichen auf Basis von www.openstreetmap.org) mit betrachteten Bereichen für Wohnbebauung (rote Schraffur) und Arbeitsstätten (grüne und rote Schraffur) sowie Sektoreneinteilung	25
Abbildung 3-5:	Karte der näheren Umgebung des Lasma (erstellt auf Basis digitaler topografischer Karten DTK5, Quelle © GeoBasis-DE/LVermGeo SH, www.LVermGeoSH.schleswig-holstein.de) mit betrachteten Bereichen für Wohnbebauung (rote Schraffur) und Arbeitsstätten (grüne und rote Schraffur) sowie Sektoreneinteilung	26
Abbildung 3-6:	Relative Anteile der durch Aktivierung entstehenden Nuklide Fe-55, Co-60 und Ni-63 an der durch diese Nuklide resultierenden Gesamtaktivität, als Funktion der Zeit	31
Abbildung 3-7:	Windrichtungshäufigkeit am Standort (Messhöhe 100 m), Mittelwerte von 2001 bis 2009 (Häufigkeit auf den Radialachsen, Sektornummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet)	35



Abbildung 3-8:	Verteilung der Niederschlagsmengen nach Sektoren für den Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009 (mittlere Jahresniederschlagsmenge auf den Radialachsen, Sektor-Nummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet).....	36
Abbildung 3-9:	Verteilung der Häufigkeiten einzelner Niederschlagsklassen für die Betrachtungszeiträume 2001 bis 2009	37
Abbildung 3-10:	Verteilung der Häufigkeiten der Windgeschwindigkeitsklassen für den Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009 (Messhöhe 100 m)	38
Abbildung 3-11:	Verteilung der Häufigkeiten der Ausbreitungsklassen (A bis F) für den Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009	38
Abbildung 4-1:	Vergleich für die Überhöhung H in einer Entfernung x von der Emissionsquelle bei unterschiedlichen Radien des Kerosinpools.....	42
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	46
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	54



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
Lasma	Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle
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)
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TBH	Transportbereitstellungshalle
VKZ	Verdampferkonzentrat

1. AUFGABENSTELLUNG

Im November 2012 wurde ein vorbehaltlicher Antrag auf Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerks Brunsbüttel (KKB) bei der zuständigen Genehmigungsbehörde gestellt [KKB 12]. Darin wird erklärt, dass KKB beabsichtigt, die beim Abbau anfallenden radioaktiven Abfälle für eine Endlagerung vorzubereiten und am Standort bis zur Abgabe an ein Bundesendlager zwischenzulagern. Dazu sollen die am Standort vorhandenen Lagerkapazitäten genutzt werden und zusätzliche Lagerkapazitäten durch Nutzungsänderungen und/oder Errichtung eines neuen Lagers geschaffen werden.

Die gegenwärtige Planung sieht vor, ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Lasma) zu errichten. Dort sollen Gebinde in einem Zustand eingelagert werden, so dass eine Abgabe an ein Bundesendlager jederzeit möglich ist (Berücksichtigung der gesetzlichen Anforderungen an den Transport dieser Gebinde sowie der Einlagerungsbedingungen für das geplante Bundesendlager Schacht Konrad). Im Mai 2014 wurde für das Lasma ein Antrag auf Erteilung einer Genehmigung gemäß § 7 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [SSV 14] zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen im Sinne des § 2 Abs. 3 Atomgesetz (AtG) [ATG 12] gestellt [KKB 14].

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 Lasma ist als auslegungsüberschreitend anzusehen und muss als Ereignis dem Restrisikobereich zugeordnet werden.

Die Betrachtung dient zur Abschätzung der Robustheit des Lasma gegen diese Einwirkungen anhand der Abschätzung der Auswirkungen von Schadensbildern unter Ansatz konservativer Randbedingungen. Auf diese Weise wird geprüft, ob ein sprunghafter Anstieg der radiologischen Auswirkungen außerhalb der Anlage absehbar ist. Zur Bewertung der ermittelten potentiellen Expositionen werden als Maßstab verschiedene Dosiskriterien 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: einatembarer Anteil bzw. Anteil der zur Exposition beiträgt (respirable fraction) und
LPF: zur Ausbreitung gelangender Anteil (leakpath factor).

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

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

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

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

Analog dazu wird in [BMU 14] formuliert:

„Falls es möglich ist, bestimmten Quelltermen (resultierend aus einem der zu Grunde gelegten Tatszenarien) eine relative Häufigkeit zuzuordnen, so kann dies in Form einer Quelltermprobabilistik bei der probabilistischen Konsequenzanalyse (Abschnitt 4.4.2¹) 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.

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

2.1.1. Freisetzungsanteile

2.1.1.1. Freisetzungsanteile nach Transportstudie Konrad

In der Transportstudie Konrad [GRS 09] wurden Freisetzungsanteile durch mechanische Belastungen sowie durch Folgenbrände bei Transportunfällen betrachtet.

Die Art des betroffenen Gebindes und die Struktur des Inhalts wird durch die in Tabelle 2-1 aufgeführten Abfallgebindegruppen (AGG) beschrieben. In den Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle für das Endlager Konrad [BFS 10] werden Abfallproduktgruppen definiert. Diese können gemäß [GRS 09], wie in Tabelle 2-2 angegeben, den Abfallgebindegruppen aus [GRS 09] zugeordnet werden.

Tabelle 2-1: Abfallgebindegruppen nach [GRS 09]

Abfallgebindegruppe	Beschreibung
AGG 1	Brennbare unfixierte Abfälle in Stahlblechcontainern
AGG 2	Unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nichtmetallische Abfälle (einschließlich Verdampferkonzentrate) in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern
AGG 3	Metallische Abfälle in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern
AGG 4	Kompaktierte Abfälle in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern
AGG 5	Zementfixierte Abfälle in Stahlblechcontainern
AGG 6	Brennbare, unfixierte Abfälle in Betonbehältern
AGG 7	Zementfixierte Abfälle in Betonbehältern
AGG 8	Abfälle in Gussbehältern

Tabelle 2-2: Zuordnung zwischen Abfallproduktgruppe (APG) nach [BFS 10] und Abfallgebindegruppe (AGG) nach [GRS 09]

Abfallproduktgruppe	Beispiel	zugeordnete Abfallgebindegruppe
APG 01	z. B. Bitumen- und Kunststoffprodukte	AGG 2 oder AGG 6
APG 02	z. B. Feststoffe	AGG 2
APG 03	z. B. metallische Feststoffe	AGG 3
APG 04	z. B. Presslinge	AGG 4
APG 05	z. B. zementierte/betonierte Abfälle	AGG 5 oder AGG 7
APG 06	z. B. Konzentrate	wie APG 02
Gussbehälter unabhängig vom Inhalt immer als AGG 8		

Die mechanischen Belastungen werden in [GRS 09] anhand der Aufprallgeschwindigkeiten bei den unterstellten Transportunfällen untergliedert. Der Energieeintrag der mechanischen Einwirkungen wird in [GRS 09] durch die in Tabelle 2-3 angegebenen Geschwindigkeitsklassen charakterisiert.

Tabelle 2-3: Belastungsklassen für rein mechanische Beschädigungen in der Transportstudie Konrad [GRS 09] mit Angabe der Absturzhöhe eines Gebindes, die der Geschwindigkeit entspricht

Belastungsklasse	Aufprallgeschwindigkeit [km/h]	unterstellte Geschwindigkeit [km/h] (in Klammern [m/s])	korrespondierende Fallhöhe [m]
BK 1	≤ 35	35 (9,7)	5
BK 4	36 – 80	80 (22)	25
BK 7	> 80	110 (31)	48

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 2-3) 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 Freisetzunganteile nach [GRS 09] für die verschiedenen Belastungsklassen und Abfallgebindergruppen sind in Tabelle 2-4 für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) aufgeführt.

Tabelle 2-4: Partikelgrößenabhängige Freisetzungsanteile für sonstige Radionuklide (ohne H-3, C-14 und Halogene) in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und Abfallgebindegruppe aus [GRS 09]

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

Die Freisetzungsanteile gemäß [GRS 09] beziehen sich für Belastungsklassen mit Brand ausdrücklich auf das leichtflüchtige Element Cäsium. 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.

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 Cäsium² angewandt.

Je nach Abfallgebindegruppe und Belastungsklasse werden in [GRS 09] Freisetzungsanteile $ARF \cdot RF$ 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 10 μm und Aerosole mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser > 10 μm .

² Mit diesen Korrekturfaktoren werden höhere potentielle Freisetzungen berechnet als mit den in [SER 10] realistisch ermittelten Korrekturfaktoren.

Nach [DIN 93] sind Partikel bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von maximal 10 µm lungengängig. Daher wird für Aerosole mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser bis 10 µm in diesem Bericht angenommen, dass diese komplett zur Dosis durch Inhalation ($RF = 1$) beitragen. Bei Aerosolen mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser (AED) > 10 µm 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 Abfallgebinden aufgrund thermischer Belastungen untersucht wird. Dabei wird von einer einstündigen Einwirkung einer Temperatur von 1000°C ausgegangen. Weiterhin werden die chemischen Elemente entsprechend ihrer Flüchtigkeit in sechs Gruppen eingeteilt, wobei die Flüchtigkeit mit höherer Gruppennummer abnimmt. In Gruppe I sind z. B. Elemente zu finden, die elementar (z. B. Edelgase oder Iod) oder in ihrer üblichen anzutreffenden Bindungsform (z. B. H als H₂O) 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 2-5 zusammengestellt.

Tabelle 2-5: Flüchtigkeitsgruppen nach [SER 10], hier relevante Gruppen und Elemente sind fett dargestellt

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

Ausgehend von temperaturabhängigen Freisetzungsraten verschiedener Abfallarten (ohne Rückhaltungswirkung von Gebinden) wird in [SER 10] die Freisetzungsraten 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 Freisetzungsteil für das Gebinde ermittelt.

In Tabelle 2-6 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 2-6: 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 2-7 zusammengestellt.

Tabelle 2-7: Freisetzunganteile nach [SER 10] für die betrachteten Gebindearten und die hier relevanten Flüchtigskeitsgruppen

Abfallgebände	Freisetzunganteil für Flüchtigskeitsgruppe (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 ³ Box	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
3 m ³ 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 (Fluchtigskeitsgruppe II) ergeben sich maximale Freisetzunganteile von $3 \cdot 10^{-2}$ (500-l-Fass mit homogen verteiltem Inhalt). In allen Fällen liegen die Freisetzunganteile für Co, Sr, Fe, Ni (alle Fluchtigskeitsgruppe IV) und Am (Fluchtigskeitsgruppe V) um mindestens einen Faktor 10 unter den jeweiligen Freisetzunganteilen für Cs.

2.1.1.3. Nutzung der Freisetzunganteile in diesem Bericht

Bei der Betrachtung des Flugzeugabsturzes ohne Folgebrand werden die Freisetzunganteile aus der Transportstudie Konrad in der Belastungskategorie BK 7 für die jeweilige Abfallgebändegruppe verwendet.

Bei der Betrachtung des Folgebrandes wird in diesem Bericht zwischen den nur thermisch betroffenen Gebänden und den mechanisch und thermisch betroffenen Gebänden unterschieden. Bei den nur thermisch belasteten Gebänden werden die Freisetzunganteile 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 µm). 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 Freisetzunganteile nach Tabelle 2-6 gemäß [SER 10] verwendet. Aus den Betrachtungen im vorherigen Abschnitt (2.1.1.2) wird deutlich, dass bei gegebener Gebänderückhaltung 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°C extrapolierten Freisetzunganteile nach [SER 10] aus Tabelle 2-6 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 $9,5 \cdot 10^{-6}$ für Am-241.

Für sonstige Abfälle werden konservativ die größten Freisetzunganteile der in [SER 10] betrachteten Abfallarten verwendet. Damit ergeben sich Freisetzunganteile 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 Freisetzungsteile zu den in den Gebinden befindlichen Reststoffen bzw. Nukliden im betrachteten Szenario ist in Abschnitt 3.3.4 aufgeführt.

Die Freisetzungsteile für Partikel mit einem AED > 10 µm ergeben sich gemäß der Transportstudie Konrad [GRS 09] aus der mechanischen Belastung und sind unabhängig von der thermischen Belastung. Daher werden diese Freisetzungsteile ohne Anwendung einer weiteren Korrektur direkt aus [GRS 09] 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 m³ (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 09] 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 Gussbehälter 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.

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

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° 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 α_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 MPa \approx 5800 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 Lasma beim betrachteten Absturz eines Flugzeuges sind in Tabelle 2-8 unter der Annahme, dass alle Trümmer und Flugzeugteile Gebinde treffen, angegeben.

Tabelle 2-8: Parameter und Berechnungsgrößen für den Aufprall eines Flugzeugs auf das Lasma

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
Masse Beton im betroffenen Konus [Mg]	20
Restgeschwindigkeit v_r [m/s]	117
Restgeschwindigkeit v_r [km/h]	423
notwendige Geschwindigkeit v_p [m/s]	67
notwendige Geschwindigkeit v_p [km/h]	242
Bruchteil Perforation und Deformation	46 %
Restenergie in Lagerhalle ³ [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] 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.

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

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 Brenndauern⁴. 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 Kerosinpools 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 m³ des Militärflugzeugs, der Annahme, dass 70 % des Kerosins zum Lachenbrand im LasmA beitragen, einer angenommenen Fläche von 100 m² zur Ausbildung des Kerosinpools 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 – VI liegt die Stellfläche eines Containers im Bereich von 2,7 m² – 6,4 m², somit sind bei einer vom Brand betroffenen Fläche von 100 m² 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.

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 09] 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/m³ 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,⁵ ergibt sich für diese ein Wär-

⁴ ggf. abgesehen von einigen kleineren „Pfüten“

⁵ 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

mestrom von ca. 20 MW. Für die Bestimmung der effektiven Emissionshöhe durch die thermische Überhöhung wird im Weiteren konservativ ein sehr niedriger Wert von 0,5 MW betrachtet (nur 2,5 % 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). Auch für diesen Fall ist der auf 0,5 MW reduzierte Wärmefluss abdeckend niedrig.

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] empfohlen⁶. 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.

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 (≤ 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 3.5).

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.

⁶ 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.

2.2.2. 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 Λ . Dieser hängt von der Niederschlagsintensität I (in mm/h) ab und ergibt sich aus dem Washoutkoeffizient Λ_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 κ 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 Λ_0 sind in Tabelle 2-9 aufgeführt.

Tabelle 2-9: Washoutkoeffizienten, Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten nach [BMU 14], basierend auf [BMU 07]

AED-Klasse	AED [μm]	Depositions- geschwindigkeit v_d [m/s]	Sedimentations- geschwindigkeit v_s [m/s]	Washoutkoeffizient Λ_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 ARTM für 36 Ausbreitungssektoren und alle vorhandenen Diffusionsklassen passende Windfelder mit einem diagnostischen Windfeldmodell berechnet, die in den eigentlichen Ausbreitungsberechnungen verwendet werden.

Mit ARTM für deterministische Bedingungen durchgeführte Vergleichsrechnungen, bei denen für ansonsten gleiche Bedingungen jeweils mit und ohne Gebäudeeinfluss gerechnet wurde, ergeben keinen signifikanten Einfluss der Gebäude bei den hier zu betrachtenden Entfernungen von mehr als 600 m zum Emissionsort. Auf die Berücksichtigung des Gebäudeeinflusses wurde daher bei den Ausbreitungsberechnungen zur Expositionsermittlung verzichtet.

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 Diffusionsklassen passende Windfelder berechnet, die in den eigentlichen Ausbreitungsberechnungen verwendet werden.

Wenn das Gelände am Standort - wie im vorliegenden Fall - nahezu eben ist (Steigungen betragen weniger als 1:20), braucht ein Einfluss des Geländes auf die Ausbreitungsverhältnisse nicht gesondert berücksichtigt zu werden.

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_{kor} abgeleitet.

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

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_{korr} 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 km × 300 km gewählt werden muss. 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 ebenso gut geeignet. Die Berücksichtigung einer während der gesamten Nuklidausbreitung 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 γ -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 (σ_y) näherungsweise auch bis 100 km Entfernung gelten. Bei Entfernungen ab 30 km ist der Einfluss der vertikalen Ausbreitungsparameter (σ_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 (σ_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° Breite, dessen Ursprung am Fußpunkt des Emissionsortes liegt. Die Sektoren werden im Uhrzeigersinn nummeriert, beginnend bei 1 für den Sektor 345° bis 15° (Nord). Die Ausbreitungsrichtungen entsprechen dabei den Windrichtungen um 180° versetzt.

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 Grund⁷ 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 VII, Teil B der StrlSchV betrachtet:

- Säuglinge (≤ 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).

⁷ 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.

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 β -Strahlung innerhalb der Abluftfahne (β -Submersion),
- äußere Strahlenexposition durch γ -Strahlung aus der Abluftfahne (γ -Submersion),
- äußere Strahlenexposition durch γ -Strahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (γ -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 2-10 aufgeführt.

Tabelle 2-10: Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [BMU 14] (basierend auf [SSK 03] für das Emissionszeitintervall 0 – 8 Stunden)

Altersgruppe	≤ 1 a	$> 1 - \leq 2$ a	$> 2 - \leq 7$ a	$> 7 - \leq 12$ a	$> 12 - \leq 17$ a	> 17 a
Atemrate [m^3/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 2-12).

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 ungeschützt⁸ im Freien aufhält, ermittelt. Bei Wohnbebauungen ist dabei von Daueraufenthalt auszugehen.

⁸ Schutzwirkungen durch Aufenthalt in Gebäuden soll hier nicht betrachtet werden, um die Anwendbarkeit der Bewertungsmaßstäbe zu gewährleisten.

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.

Für das in diesem Bericht betrachtete auslegungsüberschreitende Ereignis werden daher nur die radiologischen Modellierungen und ein Vergleich mit den entsprechenden Eingreifrichtwerten der Tabelle 2-12 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 2-11 zusammengefasst.

Tabelle 2-11: 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 γ -Submersion,
- die γ -Bodenstrahlung und
- die β -Submersion

benötigt. Die Strahlenschutzverordnung [SSV 14] 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

Die tatsächliche Strahlenexposition bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen wird im gegebenen Fall eines solchen Ereignisses nicht allein auf der Basis von Ausbreitungs- und Dosisrechnungen, sondern überwiegend auf der Basis von Messungen ermittelt werden. Modellgestützte Betrachtungen geben jedoch einen Anhaltspunkt, ob vom auslegungsüberschreitenden Ereignis zu erwarten ist, dass und ggf. welche Notfallmaßnahmen in Betracht gezogen werden müssten. Hierzu bietet der Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen [SSK 03B] entsprechende Beurteilungskriterien an, die sinngemäß angewandt werden.

Expositionswege werden gemäß [SSK 03] berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.3.1), mit Ausnahme des Ingestionswegs. 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 Monat (temporäre Umsiedlung) bzw. 1 Jahr (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 Eingreifrichtwerte⁹ gemäß [SSK 03B] sind in Tabelle 2-12 zusammengefasst.

Tabelle 2-12: Eingreifrichtwerte bezüglich effektiver Dosis für bestimmte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationszeiten und Expositionswege nach [SSK 03B] (Auszug)

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

⁹ 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.

Tatsächliche Eingreifwerte können gemäß [SSK 03B] über den Eingreifrichtwerten aus Tabelle 2-12 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 2-12 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 3.5.

3. STANDORTGEGEBENHEITEN

3.1. Lage und Gebäude

Der Standort des Kernkraftwerks befindet sich in unmittelbarer Elbnähe ca. 2,5 m ü. NN. Abbildung 3-1 zeigt einen Überblick über das Kraftwerksgelände und die Umgebung. Das Gelände am Standort ist nahezu eben. Ein Einfluss des Geländes auf die Ausbreitungsverhältnisse muss daher nicht gesondert berücksichtigt werden.



Abbildung 3-1: Kernkraftwerk Brunsbüttel, Fotografie des Kraftwerks von Südwest nach Nordost
[VAT 12]

Abbildung 3-2 zeigt ein Luftbild des KKB-Geländes mit Sektoreinteilung, deren Ursprung auf das LasmA bezogen ist. Die in Abbildung 3-2 eingezeichnete blaue Linie kennzeichnet den Verlauf des Massivzauns. Dieser umschließt das Betriebsgelände. Für Personen der allgemeinen Bevölkerung ist nur das Gelände außerhalb des Massivzauns frei zugänglich. Zusätzlich sind die im dargestellten Bereich liegenden Aufpunkte der nächstgelegenen Wohnbebauung in Rot mit Angabe der Entfernung zum LasmA dargestellt.

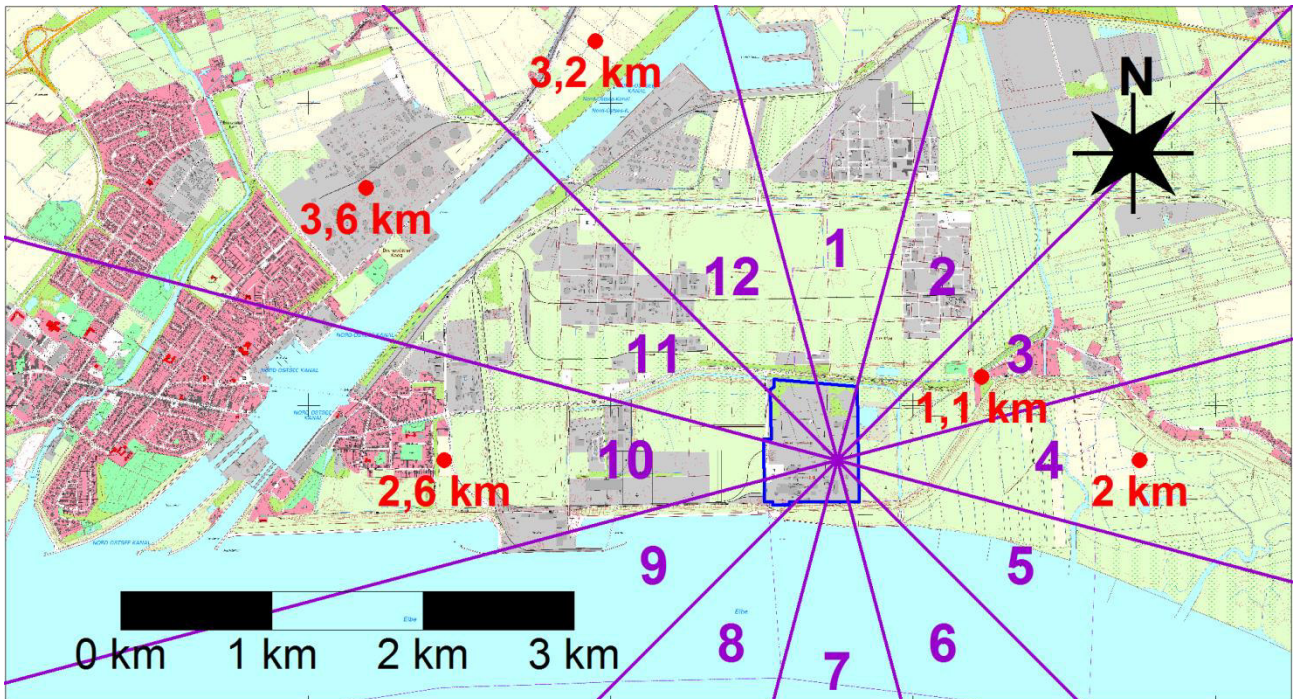


Abbildung 3-2: KKB-Gelände mit Massivzaun (blau), Aufpunkten (rot) und auf das geplante LasmaA bezogene Sektoreinteilung (Karte erstellt auf Basis digitaler topografischer Karten DTK5, Quelle © GeoBasis-DE/LVermGeo SH, www.LVermGeoSH.schleswig-holstein.de)

In Abbildung 3-3 ist die Lage des LasmaA relativ zur Grenze des Staatsgebiets gezeigt. Zusätzlich zur auf das LasmaA bezogenen Sektoreinteilung sind radiale Entfernungen zum LasmaA in km angegeben. Mit Dänemark befindet sich das am nächsten liegende Land in Sektor 1 mit einer Entfernung von etwas mehr als 100 km. Der Grenzverlauf mit Dänemark auf dem Festland ist in Abbildung 3-3 orange markiert.

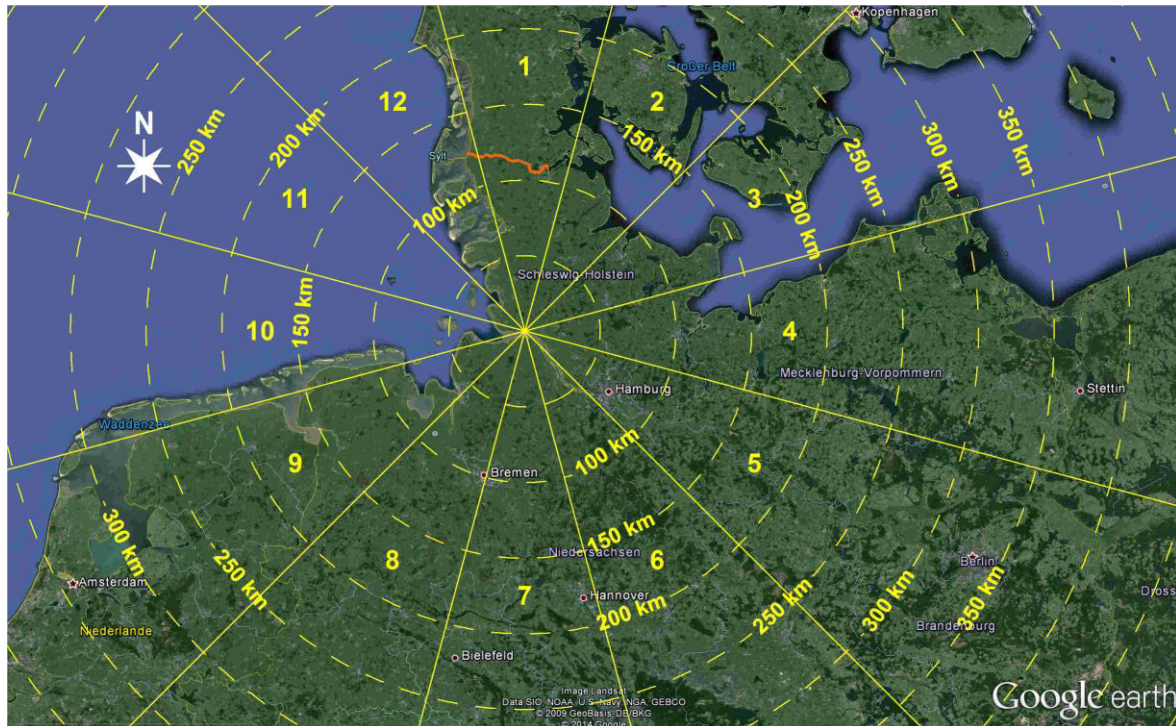


Abbildung 3-3: Lage des Lasma im Bezug zu den Grenzen des deutschen Staatsgebiets mit Sektoreinteilung und Angabe der Entfernungen in km (erstellt auf Basis von Google Earth™ Pro Kartenservice Material)

3.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigste Aufpunkte

Die probabilistischen Ausbreitungsrechnungen werden unter Verwendung meteorologischer Daten 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 am nächstgelegenen Bereich 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 3-4 in rot schraffiert und die Bereiche, in denen nur Arbeitsstätten vorhanden sind, in grün schraffiert dargestellt. Bei Berechnungen der resultierenden potentiellen Dosis für die Arbeitsstätten wurden sämtliche Bereiche berücksichtigt, also auch die Bereiche für Wohnbebauung. Abbildung 3-5 zeigt zur besseren Sichtbarkeit einen vergrößerten Ausschnitt der näheren Umgebung.

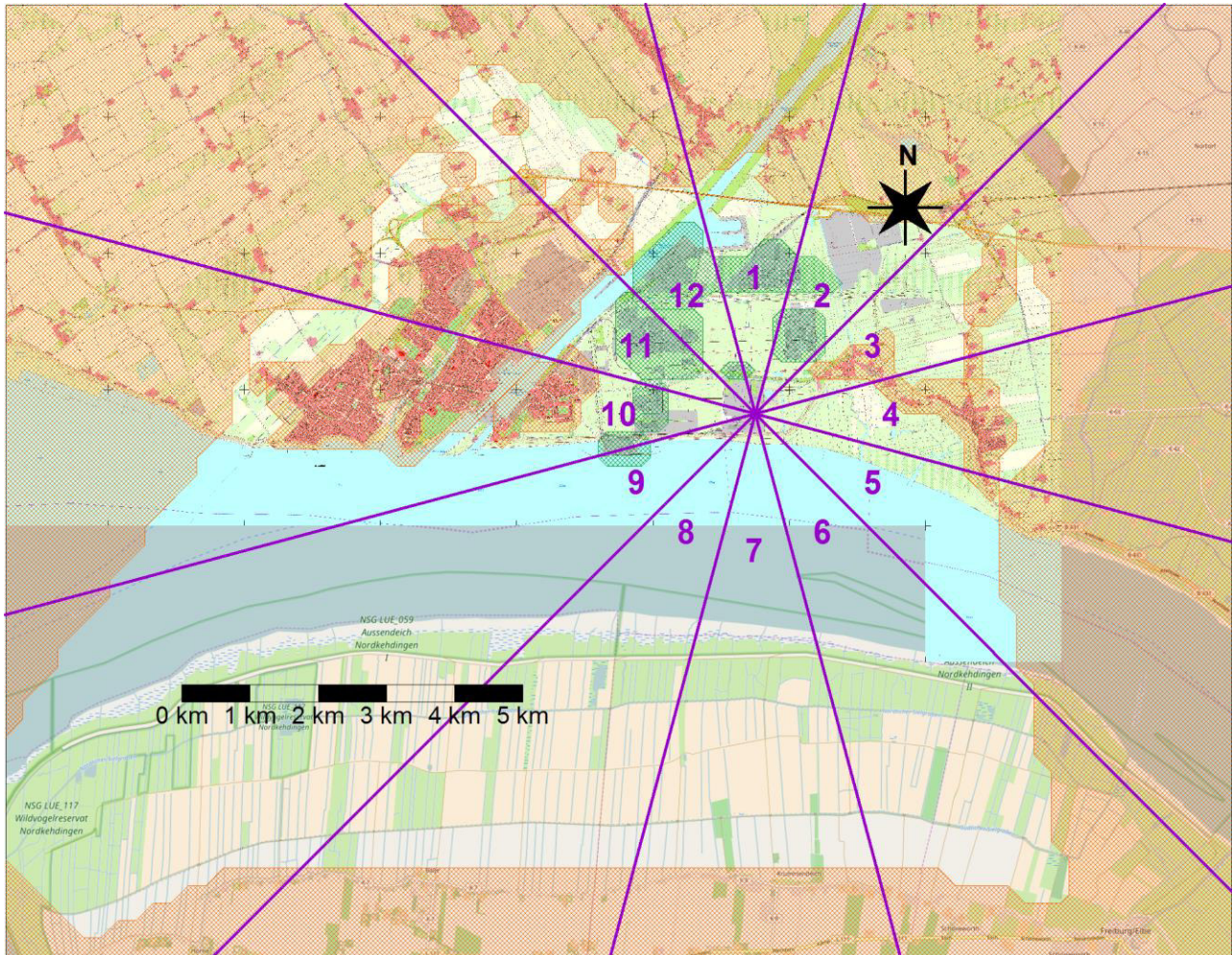


Abbildung 3-4: Karte der Umgebung (erstellt auf Basis digitaler topografischer Karten DTK5, Quelle © GeoBasis-DE/LVermGeo SH, www.LVermGeoSH.schleswig-holstein.de, sowie in den Außenbereichen auf Basis von www.openstreetmap.org) mit betrachteten Bereichen für Wohnbebauung (rote Schraffur) und Arbeitsstätten (grüne und rote Schraffur) sowie Sektoreinteilung

Die nächstgelegene Wohnbebauung befindet sich in ca. 1100 m Entfernung vom Lasma in ost-nordöstlicher Richtung (Sektor 3) in der Ortschaft Büttel. Die nächstgelegene Arbeitsstätte befindet sich in ca. 600 m Entfernung in nördlicher Richtung (Sektoren 1 und 12).

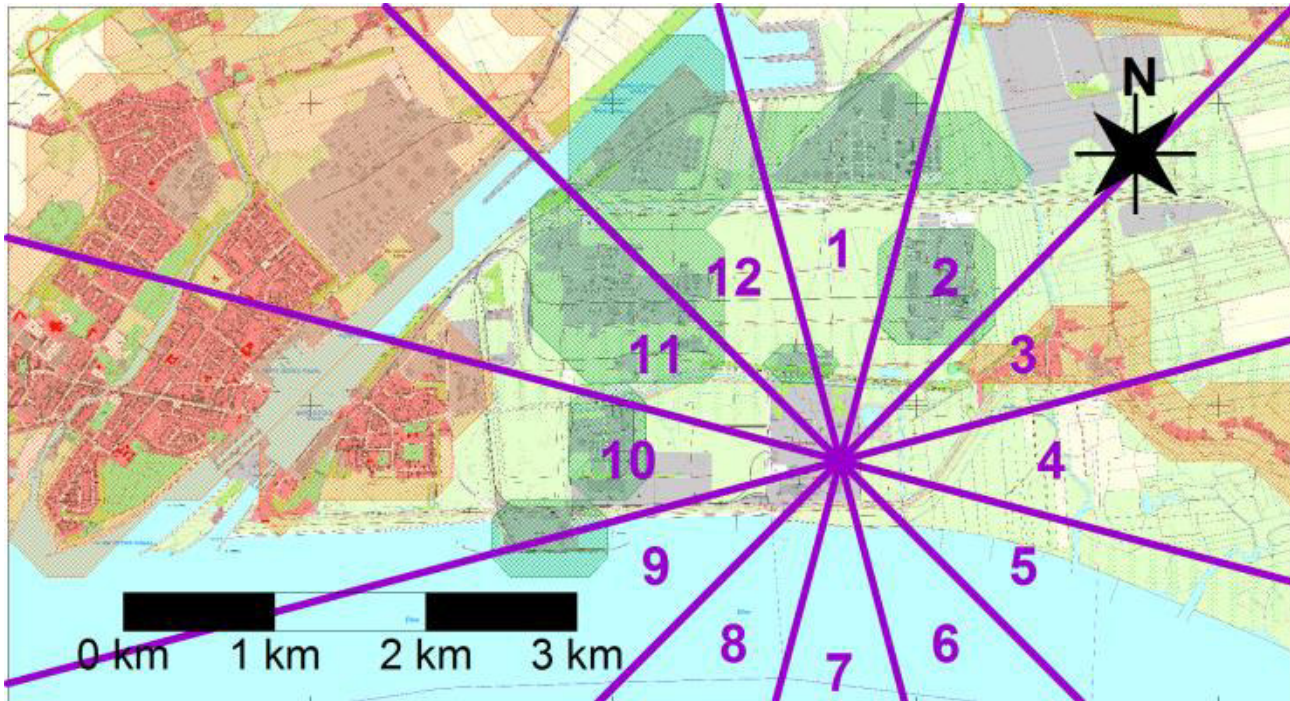


Abbildung 3-5: Karte der näheren Umgebung des LasmA (erstellt auf Basis digitaler topografischer Karten DTK5, Quelle © GeoBasis-DE/LVermGeo SH, www.LVermGeoSH.schleswig-holstein.de) mit betrachteten Bereichen für Wohnbebauung (rote Schraffur) und Arbeitsstätten (grüne und rote Schraffur) sowie Sektoreinteilung

Die nächstgelegenen Aufpunkte an der deutschen Staatsgrenze sind in Sektor 1 (0°, nördliche Richtung, Grenze zu Dänemark) zu finden und befinden sich in einer Entfernung von etwas mehr als 100 km vom LasmA. Für die in Tabelle 3-1 sektorweise aufgeführten Entfernungen des LasmA zur deutschen Staatsgrenze wurden die realen Abstände jeweils in 50 km-Schritten abgerundet und aufgrund der Beschränkungen des Rechenmodells 250 km als maximale Entfernung verwendet.

Tabelle 3-1: Entfernungen der Aufpunkte bei probabilistischer Ausbreitungsrechnung unter Verwendung meteorologischer Daten zur Abschätzung der Expositionen an der Staatsgrenze

Sektor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Richtung	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Entfernung [km]	100	100	150	250	250	250	250	250	150	250	250	100

3.3. Aktivitätsinventar

3.3.1. Berücksichtigte Aktivitäten

Nach [NUK 15] ist vorgesehen, im Lasma bis zu 2550 Endlagergebinde und bis zu 30 20'-Container einzulagern. Dabei wird bei einer Einlagerung von 20'-Containern die für andere Gebinde verfügbare Stellfläche reduziert, wodurch sich die Anzahl der Endlagergebinde verringert. Wie in den Abschnitten 4.2.1.2 und 4.3.1.2 gezeigt wird, ergeben sich aufgrund des höheren Aktivitätsinventars in den Endlagergebänden größere potentiell freigesetzte Aktivitäten, wenn das Lasma mit Endlagergebänden belegt ist und keine 20'-Container vorhanden sind.

Eine Aufteilung auf die verschiedenen Gebindetypen ist in Tabelle 3-2 angegeben.

Tabelle 3-2: Zur Einlagerung im Lasma vorgesehene Container-Typen nach [NUK 15] sowie Zuordnung zur Verteilung des Abfalltyps auf die Container

Anzahl nach [NUK 15]		Zuordnung nach Abfalltyp		
Gebindetyp	Anzahl	Gebindetyp	Abfalltyp	Anzahl
Gussbehälter Typ II	1450	Behälter Typ II	Akt. Met.	1350
		Behälter Typ II	Mischabfall	100
Stahlblechcontainer Typ II	250	Container Typ II	Akt. Met.	100
Stahlblechcontainer Typ III	200	Container Typ II – V	Mischabfall	750
Stahlblechcontainer Typ V	200			
Stahlblechcontainer Typ IV	300			
Gusscontainer Typ VI	150	Gusscontainer Typ VI	FKZ	150
20'-Container	bis zu 30		Mischabfall	

Somit sind in Summe bis zu 1600 Gussbehälter und 980 andere Container vorhanden. Die für die einzelnen Gebindetypen vorgesehenen Aktivitätsbeschränkungen sind in Tabelle 3-3 aufgeführt. 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 Freisetzungsteilen führt. Für aktivierte Metalle wird für die Zuordnung der Freisetzungsteile der Gebindetyp für den als Kontamination vorliegenden Anteil der Aktivität verwendet. Für die als Aktivierung vorliegende Aktivität wird von keiner Freisetzung ausgegangen. Da in 20'-Containern ggf. geringe Mengen brennbarer Abfälle vorliegen können, werden diese in AGG 1 eingeordnet.

Tabelle 3-3: Zulässige Einzelaktivitäten in den Gebindetypen sowie Zuordnung von ABK und APG bzw. Abfalltyp laut Annahmebedingungen für das LasmA. Die angegebenen AGG wurden gemäß Tabelle 2-2 zugeordnet. Die bei einem Störfall radiologisch nicht relevanten Nuklide H-3 und C-14 sind der Übersichtlichkeit wegen nicht aufgeführt.

Typ	ABK	APG / Abfalltyp	AGG	maximal zulässige Einzelaktivität [Bq]		
				Co-60	Cs-137	Alpha
Behälter Typ II	I	01 – 06	AGG 8 ^(a)	$3,4 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$5,0 \cdot 10^{10}$
Behälter Typ II	II	03	AGG 8 ^(a)	$3,4 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{11}$
Container Typ II	II	03	AGG 3	$1,7 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$5,0 \cdot 10^{10}$
Container Typ II – V	I	01 – 06	AGG 2 ^(b)	$3,4 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$5,0 \cdot 10^{10}$
Gusscontainer Typ VI	II	FKZ	AGG 8 ^(a)	$4,0 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{10}$
20'-Container	-	alle	AGG 1	$3,4 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^7$

^(a) Gussbehälter unabhängig vom Inhalt in AGG 8

^(b) Höchste Freisetzunganteile der möglichen AGG-Zuordnungen

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 verwendet. Die entsprechenden nuklidspezifischen Aktivitäten sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

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 3-4 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 3-4 aufgeführt. Diese Zuordnung ergibt sich aus typischerweise vorliegenden Aktivitäten der verschiedenen Abfalltypen und führt bei Vollbelegung des LasmA zu einer insgesamt eingelagerten Aktivität von $5 \cdot 10^{17}$ Bq. Die unter Beachtung der Nuklidvektoren resultierenden Maximalaktivitäten pro Gebinde sind in Tabelle 3-5 aufgeführt. Dabei wurden für Co-60, Cs-137 und Am-241 die maximal zulässigen Einzelaktivitäten der TA LasmA nach Tabelle 3-3 eingesetzt, wobei Am-241 für die α -Aktivität verwendet wurde. Die restlichen Nuklide wurden aus den Nuklidvektoren nach Abschnitt 3.3.2 für Aktivierung (NV A; Ni-63 und Fe-55 aus dem Verhältnis zu Co-60) und 3.3.3 für Kontamination (NV K; Sr-90 aus dem Verhältnis zu Cs-137) bestimmt. 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 β -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 3-4: 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	1350	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	0	0	0	$3,6 \cdot 10^{14}$
		K		$2,5 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,1 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{12}$
Behälter Typ II	Misch.	K	100	$6,9 \cdot 10^{11}$	0	0	$3,0 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{12}$
Gusscontainer Typ VI	FKZ	K	150	$3,6 \cdot 10^{11}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{11}$	$3,8 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^{11}$
Container Typ II	Akt. Met.	A	100	$1,7 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	0	0	0	$4,5 \cdot 10^{13}$
		K		$3,4 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$5,0 \cdot 10^{10}$	$5,0 \cdot 10^{12}$
Container Typ IV	VKZ	K	100	$1,0 \cdot 10^{12}$	0	0	$4,4 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{12}$
Container Typ II-V	Misch.	K	750	$2,3 \cdot 10^{11}$	0	0	$1,0 \cdot 10^{11}$	$2,5 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{11}$
20'-Container	Misch.	K	30	$3,4 \cdot 10^9$	0	0	$1,5 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^9$
Summe			2580	Gesamtaktivität [Bq]						$5,0 \cdot 10^{17}$

NV= Nuklidvektor, A = Aktivierung, K = Kontamination

Tabelle 3-5: Verwendetes maximales Nuklidinventar pro Gebinde. Die bei Betrachtung eines auslegungsüberschreitenden Ereignisses radiologisch wenig relevanten Nuklide H-3 und C-14 sind zur Übersichtlichkeit weggelassen.

Typ	NV	ABK	APG / Abfall-typ	Aktivität pro Gebinde [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
Behälter Typ II	A	ABK II	APG 03	$3,3 \cdot 10^{14}$	$3,2 \cdot 10^{14}$	$3,2 \cdot 10^{14}$	0	0	0
	K			$6,8 \cdot 10^{12}$	0	0	$3,0 \cdot 10^{12}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$
Behälter Typ II	K	ABK I	APG 01 – 06	$3,4 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$5,0 \cdot 10^{10}$
Gusscontainer Typ VI	K	ABK II	FKZ	$4,0 \cdot 10^{11}$	0	0	$1,0 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$
Container Typ II	A	ABK II	APG 03	$1,4 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	0	0	0
	K			$3,1 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$5,0 \cdot 10^{10}$
Container Typ II-V ^(a)	K	ABK I	APG 01 – 06	$3,4 \cdot 10^{12}$	0	0	$1,5 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$5,0 \cdot 10^{10}$
20'-Container	K	-	alle	$3,4 \cdot 10^9$	0	0	$1,5 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$

^(a) Begrenzung für Container Typ II – V gilt auch für Container Typ IV mit VKZ

NV= Nuklidvektor, A = Aktivierung, K = Kontamination

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 ein Anteil von 1 % der Gesamtaktivität im Gebinde in Form von Kontamination vorliegt. Für aktivierte Metalle in Containern des Typs II wird davon ausgegangen, dass ein Anteil von 10 % der Gesamtaktivität¹⁰ im Gebinde in Form von Kontamination vorliegt.

Für Container des Typs IV mit Verdampferkonzentraten (VKZ) ist keine separate Beschränkung der Aktivität eines Gebindes vorgesehen, hier gelten die in Tabelle 3-5 angegebenen Maximalwerte für Container der Typen II – V (APG 01 – 06). In den nachfolgenden Betrachtungen zur Freisetzung aus den Gebinden werden daher Container des Typs IV mit VKZ nicht getrennt aufgeführt, sondern mit den Containern der Typen II – V (APG 01 – 06) berücksichtigt. Für mechanisch betroffene Gebinde wird dabei die Maximalaktivität verwendet. Bei rein thermischer Belastung wird das Maximum der mittleren Gebindeaktivitäten des Container-Typs IV (VKZ) und der Container-Typen II – V (APG 01 – 06) verwendet.

3.3.2. 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. Die daraus resultierenden Anteile sind in Abbildung 3-6 grafisch dargestellt.

¹⁰ 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.

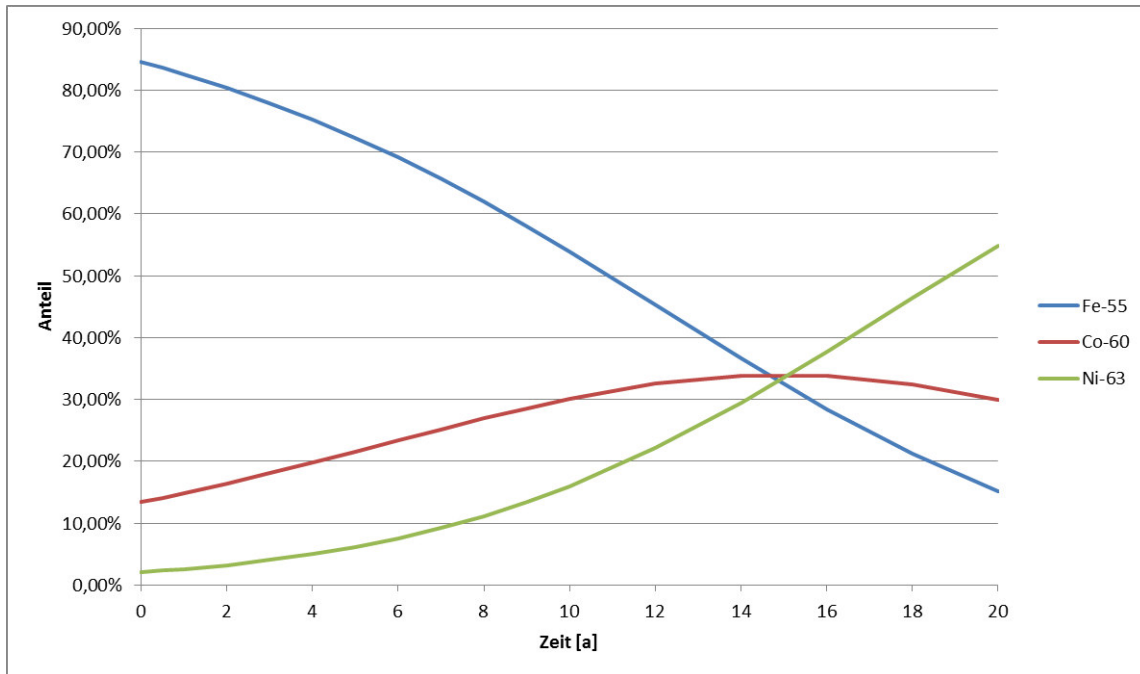


Abbildung 3-6: Relative Anteile der durch Aktivierung entstehenden Nuklide Fe-55, Co-60 und Ni-63 an der durch diese Nuklide resultierenden Gesamtaktivität, als Funktion der Zeit

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 3-6 aufgeführt.

Tabelle 3-6: Nuklidvektor A für Aktivierung

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

3.3.3. 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 den Transportbereitstellungshallen (TBH) vorhandenen Gebinden wird ein typisches Verhältnis von $A_{Sr-90}/A_{Cs-137} = 2,5/100$ angesetzt. Weiterhin wird stellvertretend für alle Kernbrennstoff-

fe¹¹ (α -Strahler) Am-241 mit einem Gesamtanteil von 1 % in der Kontamination berücksichtigt. Dieser Anteil ist konservativ gegenüber der Annahme von 0,1%, die im Sicherheitsbericht getroffen wurde [KKB 14].

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. Die vorliegenden Daten zum nuklidspezifischen Inventar der in den Transportbereitstellungshallen (TBH) vorhandenen Gebinde sind konsistent zu dieser Annahme.

Insgesamt ergibt sich somit der in Tabelle 3-7 angegebene normierte Nuklidvektor K für Kontaminationen in Gebinden, die im LasmA eingelagert werden sollen.

Tabelle 3-7: Nuklidvektor K für Kontamination

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

3.3.4. Zuordnung der Freisetzungssanteile zu den Gebinden

Die Zuordnung der Freisetzungssanteile zu den betroffenen Gebinden erfolgt, indem für die mechanisch und thermisch betroffenen Gebinde die Belastungsklasse BK 8 bzw. die Freisetzungssanteile nach [SER 10] angesetzt werden. Für die nur thermisch betroffenen Gebinde wird die Belastungsklasse BK 2 verwendet, für nur mechanisch betroffene Gebinde BK 7.

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. Bei allen anderen Behältern wird konservativ AGG 1 (brennbare Abfälle) oder AGG 2 (nicht brennbare Abfälle) verwendet. Eine Zusammenfassung der Zuordnung ist in Tabelle 3-8 und Tabelle 3-9 angegeben. Bei thermischer Belastung werden die Freisetzungssanteile nach [GRS 09] 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 μ m noch mit einem Faktor 0,1 reduziert.

¹¹ Aus der Betriebshistorie des KKB liegen keine Erkenntnisse vor, die eine signifikante α -Kontamination erwarten lassen. Die Annahme von 1 % Am-241 erfolgt konservativ.

Tabelle 3-8: 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
Gussbehälter	AGG 8	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0
Kontamination an metallischen Reststoffen in Containern	AGG 3	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$
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 3-9: 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
Gussbehälter	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]	$2,0 \cdot 10^{-4 (b)}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-4 (b)}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$
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 2001 bis 2009 in Form einer 4-parametrischen Statistik verwendet ([BS 06], [BS 13]¹²). Dabei dienen die in 100 m Höhe ermittelten Daten als Grundlage für die Ausbreitungsrechnung.

Es wurden 10 Windgeschwindigkeitsklassen verwendet, die in Tabelle 3-10 aufgeführt sind.

¹² In [BS 13] wurde dargelegt, dass diese Daten auch für den Zeitraum bis zum Jahr 2012 als repräsentativ angesehen werden können.

Tabelle 3-10: Windgeschwindigkeitsklassen für die probabilistische Ausbreitungsberechnung

Windgeschwindigkeitsklasse	verwendeter Wert [m/s]
0 bis 1 m/s	0,5
1 bis 2 m/s	1,5
2 bis 3 m/s	2,5
3 bis 5 m/s	4,0
5 bis 7 m/s	6,0
7 bis 9 m/s	8,0
9 bis 12 m/s	10,5
12 bis 15 m/s	13,5
15 bis 18 m/s	16,5
> 18 m/s	18,0

Die Windrichtung wird in 12 Sektoren zu je 30°, beginnend mit Sektor 1 in Richtung Nord (0°), im Uhrzeigersinn umlaufend klassifiziert.

Die verwendeten Niederschlagsklassen umfassen

- keinen Niederschlag,
- < 0,5 mm/h,
- 0,5 mm/h bis 3 mm/h und
- > 3 mm/h.

Es werden die 6 Pasquil-Ausbreitungsklassen (A bis F) verwendet.

Abbildung 3-7 zeigt die Windrichtungsverteilung am Standort für die Messhöhe von 100 m.

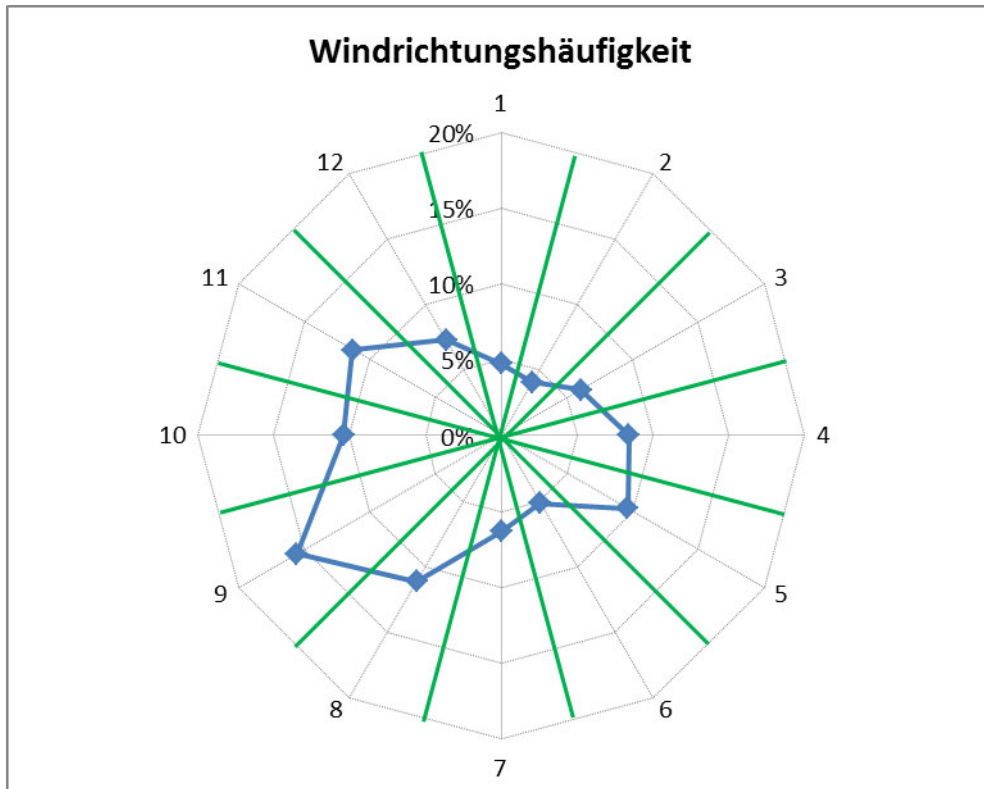


Abbildung 3-7: Windrichtungshäufigkeit am Standort (Messhöhe 100 m), Mittelwerte von 2001 bis 2009 (Häufigkeit auf den Radialachsen, Sektornummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet)

Am häufigsten wird Wind aus Sektor 9 beobachtet. Die Sektoren 8, 10 und 11 weisen annähernd ähnlich große Häufigkeiten auf (Westwind). Ein zweites kleineres Maximum erkennt man für Wind aus den Sektoren 4 und 5 (Ostwind). Am seltensten werden dagegen Wind aus den Sektoren 1, 2 und 3 sowie Wind aus den Sektoren 6 und 7 beobachtet.

In Abbildung 3-8 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. Die Sektoren 12 bis 6 sind mit vergleichsweise geringen Niederschlägen vertreten. Die südlichen Sektoren 7 und 8 bilden einen Übergangsbereich.

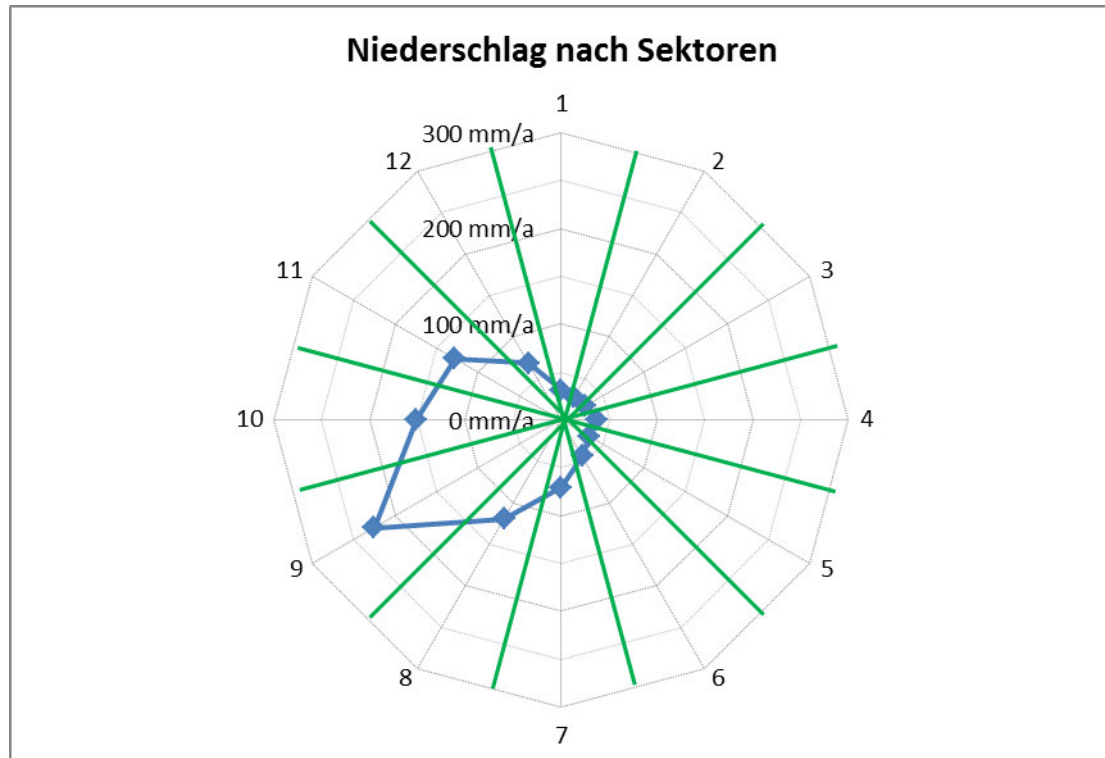


Abbildung 3-8: Verteilung der Niederschlagsmengen nach Sektoren für den Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009 (mittlere Jahresniederschlagsmenge auf den Radialachsen, Sektor-Nummer auf dem Umkreis, die Sektorengrenzen sind in grün eingezeichnet)

In Abbildung 3-9 ist die Häufigkeit der beobachteten Niederschlagsintensitäten (aufgeteilt auf die in Tabelle 3-11 aufgeführten vier Klassen) dargestellt. In ca. 80 % der Beobachtungsintervalle (Intervalllänge jeweils eine Stunde) wird kein Niederschlag beobachtet. Die jeweilige mittlere Intensität in den einzelnen Klassen ist ebenfalls in Tabelle 3-11 angegeben.

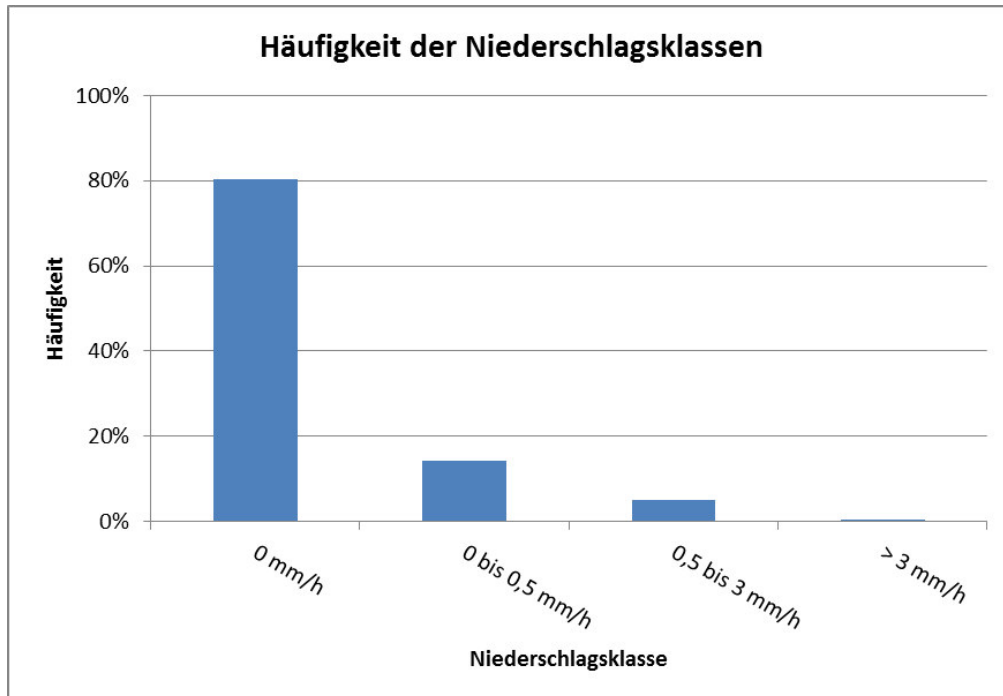


Abbildung 3-9: Verteilung der Häufigkeiten einzelner Niederschlagsklassen für die Betrachtungszeiträume 2001 bis 2009

Tabelle 3-11: Niederschlagsklassen für die probabilistische Ausbreitungsberechnung

Niederschlagsklasse	Wert [mm/h]
0 mm/h	0,000
0 bis 0,5 mm/h	0,210
0,5 bis 3 mm/h	1,000
> 3 mm/h	6,459

Abbildung 3-10 zeigt die Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsklassen für die Messhöhe 100 m. Der Mittelwert der Windgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009 beträgt 7,9 m/s. Die häufigsten Windgeschwindigkeiten treten in den Klassen 5 bis 7 m/s, 7 bis 9 m/s und 9 bis 12 m/s auf, die in Summe ca. 63 % der Situationen abdecken. Geringere Windgeschwindigkeiten treten in ca. 24 % der Situationen auf.

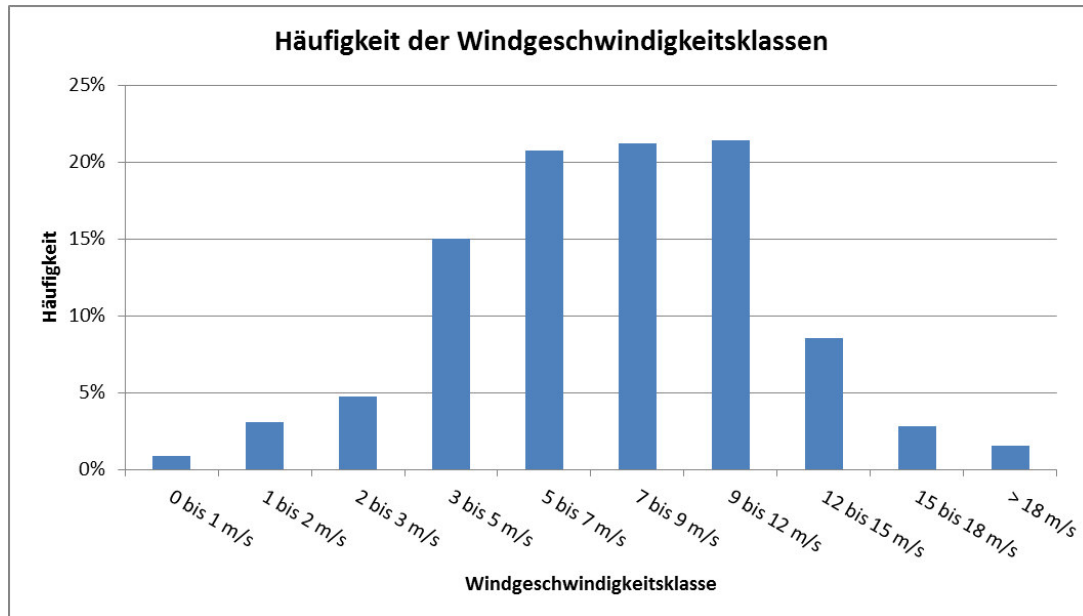


Abbildung 3-10: Verteilung der Häufigkeiten der Windgeschwindigkeitsklassen für den Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009 (Messhöhe 100 m)

Abbildung 3-11 zeigt die Häufigkeit der Ausbreitungsklassen (A bis F, entsprechend V bis I nach Klug/Manier). Dabei wird die neutrale Ausbreitungsklasse D im Betrachtungszeitraum von 2001 bis 2009 am häufigsten beobachtet. Diese tritt in ca. 43 % der Situationen auf.

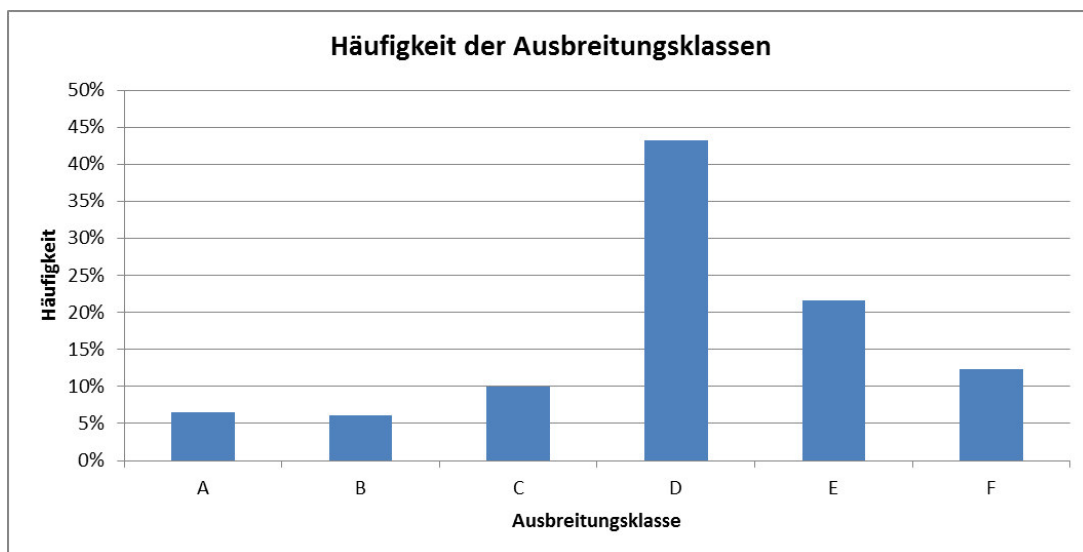


Abbildung 3-11: Verteilung der Häufigkeiten der Ausbreitungsklassen (A bis F) für den Betrachtungszeitraum 2001 bis 2009

3.5. Bemerkungen zur Methodik bei der probabilistischen Ausbreitungsrechnung

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

Da keine Zeitreihe vorlag, wurden die meteorologischen Daten aus den Jahren 2001 bis 2009 in Form einer 4-parametrischen Statistik verwendet, in der die Häufigkeit für jede meteorologische Klasse angegeben ist. Die Klasseneinteilung erfolgt gemäß der Niederschlagsmenge (Klasseneinteilung siehe Tabelle 3-11), Windrichtung (Einteilung in 12 Sektoren mit einer Ausdehnung von jeweils 30°), Windgeschwindigkeit (Klasseneinteilung siehe Tabelle 3-10) und Diffusionskategorie (6 Klassen, entsprechend A bis F).

Für jede dieser meteorologischen Klassen¹³ erfolgt eine ARTM-Ausbreitungsrechnung mit den jeweiligen Klassenmittelwerten für eine Freisetzungsdauer von 1 Stunde. Dabei werden die Ausbreitungsbedingungen konstant gehalten. Um den Durchzug der freigesetzten Radionuklide über das Rechengebiet zu ermöglichen, 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. Bei Freisetzungen, die sich über mehr als eine Stunde erstrecken ist dieser Ansatz konservativ, da über den gesamten Zeitraum der Freisetzung eine Ausbreitung in die gleiche Richtung erfolgt und somit die Ablagerung bei Aufpunkten in Ausbreitungsrichtung vergrößert wird.

Aus den ARTM-Ausbreitungsrechnungen ergeben sich dann für jede meteorologische Situation Mittelwerte für die Konzentrationen, die trockenen Depositionen, die nassen Depositionen und die Gammawolkenstrahlung (γ -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 ist¹⁴ und die Berechnung dieses Anteils zeitaufwändiger ist als der der anderen Beiträge, wird auf die Berechnung der Gammawolkenstrahlung durch ARTM 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

¹³ Für meteorologische Klassen, die eine Häufigkeit von 0 besitzen, also nicht auftreten, wird keine Berechnung durchgeführt

¹⁴ Dies wurde durch Anwendung des Modells BSSBG (Gauss-Fahnenmodell für die Ausbreitung) geprüft.

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 3-4 und Abbildung 3-5) 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 2-11 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 Zeitraums 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 be-

stimmt, 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.

Zusätzlich wurden zwei weitere Analysen durchgeführt, für die bei den Ausbreitungsrechnungen die Windrichtung nicht auf die Sektormitte gelegt wurde, sondern um $\pm 10^\circ$ variiert wurde. Damit wird ein Effekt der Diskretisierung der Windrichtungen bei der Verwendung der 4-parametrischen Statistik auf das 95 %-Quantil abgeschätzt. Dieser Effekt erweist sich im vorliegenden Fall als gering.

4. DOSISBERECHNUNGEN

4.1. Ausbreitungsberechnungen

4.1.1. Bestimmung der effektiven Emissionshöhe

Für den Fall des Flugzeugabsturzes ohne Folgebrand wird keine thermische Überhöhung berücksichtigt.

Für den Fall des Flugzeugabsturzes mit Folgebrand wird eine thermische Überhöhung berücksichtigt, allerdings wird der zur Ausbildung der Überhöhung verwendete Wärmefluss gegenüber den zur Verfügung stehenden 20 MW für die Ausbreitungsrechnungen deutlich auf 0,5 MW reduziert (siehe Abschnitt 2.1.2.2). Dieser Wert ist auch abdeckend für die Korrektur, die bei einem ausgedehnten Kerosinpool notwendig wird. 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 Pooldurchmesser bei einem konstanten Wärmestrom von $M = 20$ MW berechnet.

Dann wurde die Überhöhung für einen geringeren Wärmestrom M_{kor} ohne Korrektur auf den Pooldurchmesser so berechnet, so dass sich eine geringere effektive Emissionshöhe als im Fall der 20 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 bei unterschiedlichen Radien des Kerosinpools ($R = 0 \text{ m} - 10 \text{ m}$)¹⁵ und einem Wärmestrom von 20 MW mit der resultierenden Überhöhung bei einem Wärmestrom von 3 MW bzw. 0,5 MW ohne Berücksichtigung der Ausdehnung des Kerosinpools gezeigt (jeweils schwarze bzw. blaue Kurve).

¹⁵ Eine Fläche von 100 m² für den Brand entspricht einem Radius von ca. 5,6 m. Somit sind 10 m in diesem Fall ausreichend groß gewählt.

Ein auf 3 MW korrigierter Wärmestrom (ohne „Pool-Korrektur“) ergibt in allen Fällen für Abstände ab der nächstgelegenen Bebauung (ca. 600 m) eine deutlich niedrigere Emissionshöhe, ein Wärmestrom von 0,5 MW ist noch konservativer.

Zur Vermeidung von mehrfachen aufwändigen ARTM-Berechnungen mit unterschiedlichen Wärmeströmen bei gleichen sonstigen Ausbreitungsbedingungen wurde in den Ausbreitungsberechnungen mit Überhöhung ein konservativ niedriger Wärmestrom von 0,5 MW berücksichtigt. Dieser ist auch für größere Wärmeströme abdeckend.

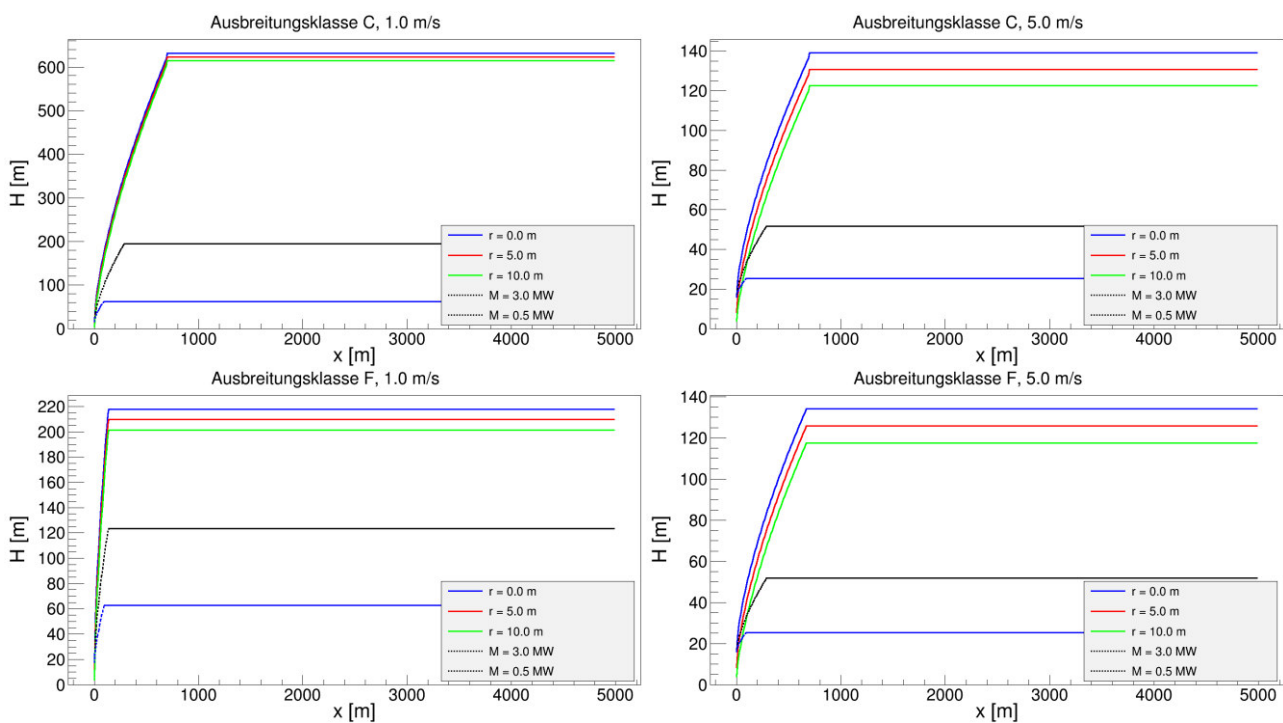


Abbildung 4-1: Vergleich für die Überhöhung H in einer Entfernung x von der Emissionsquelle bei unterschiedlichen Radien des Kerosinpools

4.1.2. Rechengitter

Für die Ausbreitungsberechnungen in ARTM wurden mehrere geschachtelte Rechengitter definiert, die sich maximal über einen Bereich von 51,2 km \times 51,2 km erstrecken, dessen Ursprung auf das LasmA 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. Quelltermermittlung

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 LasmA betroffene Aktivitäten

Anzahl und Typ	NV	ABK	APG / Abfall-typ	betroffene Aktivität [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
56 Behälter Typ II	A	ABK II	APG 03	$1,9 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	0	0	0
	K			$3,8 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,7 \cdot 10^{14}$	$4,2 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^{12}$
56 Behälter Typ II	K	ABK I	APG 01 – 06	$1,9 \cdot 10^{14}$	0	0	$8,4 \cdot 10^{13}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$2,8 \cdot 10^{12}$
28 Gusscontainer Typ VI	K	ABK II	FKZ	$1,1 \cdot 10^{13}$	0	0	$2,8 \cdot 10^{13}$	$7,0 \cdot 10^{12}$	$3,9 \cdot 10^{11}$
28 Container Typ II	A	ABK II	APG 03	$3,9 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{14}$	0	0	0
	K			$8,7 \cdot 10^{13}$	0	0	$4,2 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
28 Container Typ II-V ^(a)	K	ABK I	APG 01 – 06	$9,5 \cdot 10^{13}$	0	0	$4,2 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
28 20'-Container	K	-	alle	$9,5 \cdot 10^{10}$	0	0	$4,2 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^8$

^(a) Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

4.2.1.2. Freigesetzte Aktivität

Die Freisetzunganteile 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 die in Tabelle 4-3 angegebenen potentiell freigesetzten Aktivitäten.

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

	AED	Behälter Typ II		Behälter Typ II	Gusscontainer Typ VI	Container Typ II		Container Typ II – V ^{b)}	20'-Container
		APG 03		APG 01 – 06	FKZ	APG 03		APG 01 – 06	alle
		A	K	K	K	A	K	K	K
		AGG 8	AGG 8	AGG 8	AGG 8	-	AGG 3	AGG 2	AGG 1
Freisetzungsanteile (BK 7)									
<i>ARF</i> ^{a)}	≤ 10 μm	0	3,0·10 ⁻⁸	3,0·10 ⁻⁸	3,0·10 ⁻⁸	0	3,0·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁴	3,0·10 ⁻⁴
	> 10 μm	0	0	0	0	0	6,0·10 ⁻⁶	6,0·10 ⁻⁴	6,0·10 ⁻⁴
Faktor für Gebäuderückhaltung									
<i>LPF</i>	≤ 10 μm	1							
	> 10 μm	1							
potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]									
<i>ST</i> (Co-60)	≤ 10 μm	0	1,1·10 ⁷	5,7·10 ⁶	3,4·10 ⁵	0	2,6·10 ⁸	2,9·10¹⁰	2,9·10 ⁷
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	5,0·10 ⁶	2,5·10 ⁶	8,4·10 ⁵	0	1,3·10 ⁸	1,3·10¹⁰	1,3·10 ⁷
<i>ST</i> (Sr-90)		0	1,3·10 ⁵	6,3·10 ⁴	2,1·10 ⁴	0	3,2·10 ⁶	3,2·10⁸	3,2·10 ⁵
<i>ST</i> (Am-241)		0	1,7·10 ⁵	8,4·10 ⁴	1,2·10 ⁴	0	4,2·10 ⁶	4,2·10⁸	8,4·10 ⁴
<i>ST</i> (Gesamt)		0	1,7·10 ⁷	8,4·10 ⁶	1,2·10 ⁶	0	4,0·10 ⁸	4,2·10¹⁰	4,2·10 ⁷
<i>ST</i> (Co-60)	> 10 μm	0	0	0	0	0	5,2·10 ⁸	5,7·10¹⁰	5,7·10 ⁷
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	0	0	0	0	2,5·10 ⁸	2,5·10¹⁰	2,5·10 ⁷
<i>ST</i> (Sr-90)		0	0	0	0	0	6,3·10 ⁶	6,3·10⁸	6,3·10 ⁵
<i>ST</i> (Am-241)		0	0	0	0	0	8,4·10 ⁶	8,4·10⁸	1,7·10 ⁵
<i>ST</i> (Gesamt)		0	0	0	0	0	7,9·10 ⁸	8,4·10¹⁰	8,3·10 ⁷

a) luftgetragener freigesetzter Anteil (airborne release fraction)

b) Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

Die größten potentiell freigesetzten Aktivitäten ergeben sich für Container der Typen II – V der APG 01 – 06. Diese werden bei den im Folgenden beschriebenen Ausbreitungs- und Dosisberechnungen als abdeckende Werte für die potentielle Freisetzung beim Absturz eines Militärflugzeugs ohne Folgebrand verwendet.

Wie aus Tabelle 4-3 weiterhin ersichtlich wird, sind die 20'-Container mit Mischabfällen durch die Container der Typen II – V der APG 01 – 06 abgedeckt. Dies liegt an der Vergleichbarkeit der Abfälle und am wesentlich kleineren zulässigen Aktivitätsinventar der 20'-Container. Da bei Einlagerung von 20'-Containern Stellplätze von Endlagergebänden belegt werden und somit weniger dieser

Endlagergebäude im LasmA vorhanden sind, ist eine Betrachtung konservativ, wenn nur Endlagergebäude eingelagert werden.

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

Die Maximalwerte für Ausbreitungsfaktoren in den einzelnen Betrachtungsbereichen wurden wie in Abschnitt 3.5 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 unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Wettersituationen (gemäß der 4-parametrischen Statistik) 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.

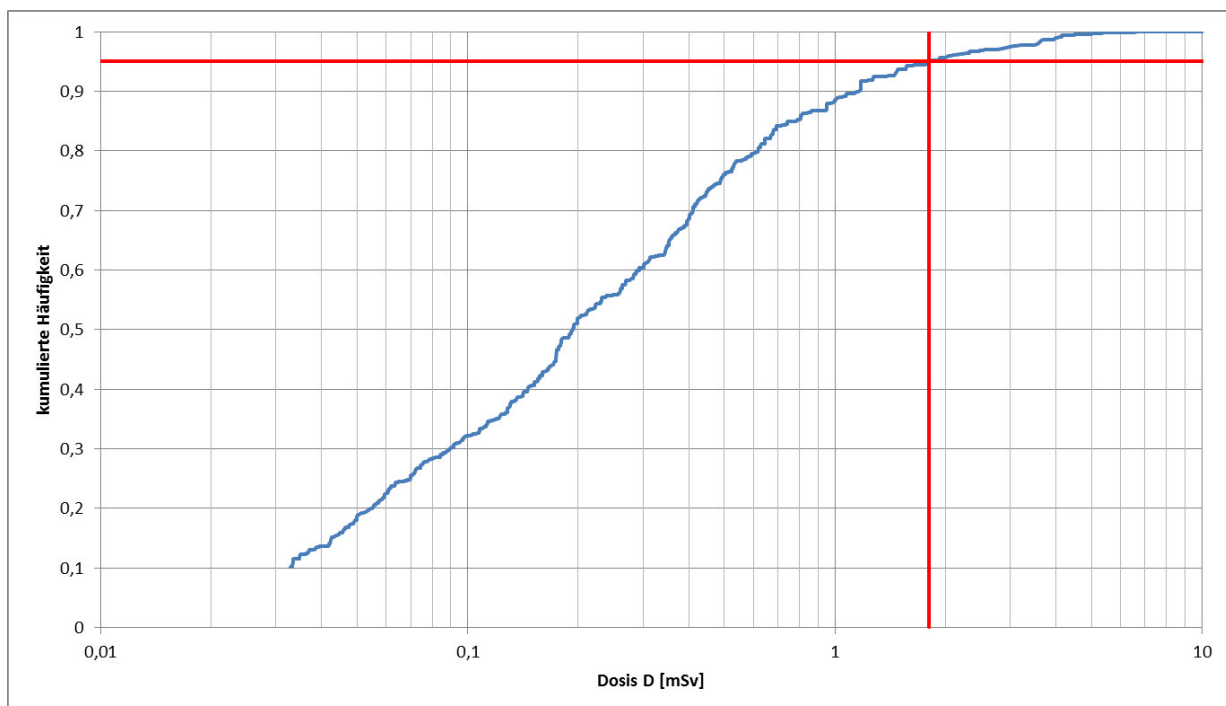


Abbildung 4-2: Histogramm der kumulierten Häufigkeit für die 1-Jahres-Folgedosis (Säuglinge) an Orten mit Wohnbebauung (Häufigkeit für effektive Dosis kleiner als D) mit Markierung für das 95 %-Quantil

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	0,18	1,8	0,50	1,6
1 – 2 a	0,29	1,8	0,83	1,8
2 – 7 a	0,33	1,7	0,95	1,8
7 – 12 a	0,46	1,7	1,3	2,1
12 – 17 a	0,53	1,7	1,6	2,3
> 17 a	0,63	1,7	1,9	2,5

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 γ -Bodenstrahlung verursacht. Die am höchsten belastete Altersgruppe ist die Altersgruppe der Säuglinge (≤ 1 a) mit einer effektiven Dosis aus äußerer Bestrahlung und Inhalation von 0,003 mSv für den Betrachtungszeitraum von 7 Tagen bzw. 0,14 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	100	2,8E-3	100	9,2E-5	2,9E-3
Kleinkinder (1-2 Jahre)			2,6E-3		1,6E-4	2,8E-3
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			2,3E-3		1,7E-4	2,5E-3
Schulkinder (7-12 Jahre)			2,1E-3		2,6E-4	2,4E-3
Jugendliche (12-17 Jahre)			1,9E-3		3,0E-4	2,2E-3
Erwachsene (> 17 Jahre)			1,7E-3		3,6E-4	2,1E-3
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	1 Jahr	100	0,14	100	9,2E-5	0,14
Kleinkinder (1-2 Jahre)			0,13		1,6E-4	0,13
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			0,11		1,7E-4	0,11
Schulkinder (7-12 Jahre)			0,10		2,6E-4	0,10
Jugendliche (12-17 Jahre)			9,5E-2		3,0E-4	9,5E-2
Erwachsene (> 17 Jahre)			8,6E-2		3,6E-4	8,6E-2

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 Co-60 im Mittel über alle Altersklassen zu etwa 81 % bei. Der Beitrag durch die restlichen Nuklide beläuft sich auf etwa 9 % (Cs-137) und 9 % (Am-241). Der Hauptanteil der Dosisbelastung wird durch γ -Bodenstrahlung erzeugt. Für den Betrachtungszeitraum 1 Jahr liefert Co-60 mit 89 % als Mittelwert über alle Altersklassen den größten Anteil an der potentiellen Effektivdosis. Der Beitrag durch die restlichen Nuklide beläuft sich auf etwa 11 % (Cs-137). Auch hier liefert die potentielle Exposition durch γ -Bodenstrahlung den Hauptbeitrag zur Dosisbelastung.

Die potentielle Exposition durch γ -Bodenstrahlung¹⁶ wird fast ausschließlich durch die Nuklide Co-60 (ca. 90 %) und Cs-137 (ca. 10 %) verursacht.

¹⁶ Anteile der einzelnen Nuklide über die verschiedenen Altersgruppen gemittelt

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

Alter	Betrachtungszeitraum	Effektive Dosis [mSv]				
		Co-60	Cs-137	Sr-90	Am-241	Summe
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	7 Tage	2,5E-3	2,9E-4	1,5E-7	8,7E-5	2,9E-3
Kleinkinder (1-2 Jahre)		2,4E-3	2,7E-4	2,5E-7	1,5E-4	2,8E-3
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		2,1E-3	2,4E-4	2,8E-7	1,7E-4	2,5E-3
Schulkinder (7-12 Jahre)		1,9E-3	2,2E-4	3,4E-7	2,5E-4	2,4E-3
Jugendliche (12-17 Jahre)		1,7E-3	1,9E-4	3,9E-7	2,9E-4	2,2E-3
Erwachsene (> 17 Jahre)		1,6E-3	1,7E-4	4,4E-7	3,4E-4	2,1E-3
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	1 Jahr	0,12	1,5E-2	1,5E-7	1,1E-4	0,14
Kleinkinder (1-2 Jahre)		0,12	1,4E-2	2,5E-7	1,7E-4	0,13
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		0,10	1,2E-2	2,8E-7	1,8E-4	0,11
Schulkinder (7-12 Jahre)		9,3E-2	1,1E-2	3,4E-7	2,6E-4	0,10
Jugendliche (12-17 Jahre)		8,5E-2	9,5E-3	3,9E-7	3,1E-4	9,5E-2
Erwachsene (> 17 Jahre)		7,7E-2	8,6E-3	4,4E-7	3,6E-4	8,6E-2

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 maximal möglichen Aktivitätsinventar pro Gebinde nach Tabelle 3-5 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 Militärflugzeugs mit Folgebrand im Lasma thermisch und mechanisch betroffene Aktivitäten (BK 8)

Anzahl und Typ	NV	ABK	APG / Abfall-typ	betroffene Aktivität [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
56 Behälter Typ II	A	ABK II	APG 03	$1,9 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	0	0	0
	K			$3,8 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,7 \cdot 10^{14}$	$4,2 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^{12}$
56 Behälter Typ II	K	ABK I	APG 01 – 06	$1,9 \cdot 10^{14}$	0	0	$8,4 \cdot 10^{13}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$2,8 \cdot 10^{12}$
28 Gusscontainer Typ VI	K	ABK II	FKZ	$1,1 \cdot 10^{13}$	0	0	$2,8 \cdot 10^{13}$	$7,0 \cdot 10^{11}$	$3,9 \cdot 10^{11}$
28 Container Typ II	A	ABK II	APG 03	$4,8 \cdot 10^{14}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	0	0	0
	K			$9,5 \cdot 10^{13}$	0	0	$4,2 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
28 Container Typ II-V ^{a)}	K	ABK I	APG 01 – 06	$9,5 \cdot 10^{13}$	0	0	$4,2 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
28 20'-Container	K	-	alle	$9,5 \cdot 10^{10}$	0	0	$4,2 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^8$

^{a)} Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

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

Anzahl und Typ	NV	ABK	APG / Abfall-typ	betroffene Aktivität [Bq]					
				Co-60	Ni-63	Fe-55	Cs-137	Sr-90	Am-241
94 Behälter Typ II	A	ABK II	APG 03	$1,1 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	0	0	0
	K			$2,4 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,0 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{12}$
94 Behälter Typ II	K	ABK I	APG 01 – 06	$6,5 \cdot 10^{13}$	0	0	$2,8 \cdot 10^{13}$	$7,1 \cdot 10^{11}$	$9,4 \cdot 10^{11}$
122 Gusscontainer Typ VI	K	ABK II	FKZ	$4,4 \cdot 10^{13}$	0	0	$1,8 \cdot 10^{13}$	$4,6 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^{11}$
122 Container Typ II	A	ABK II	APG 03	$2,1 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	0	0	0
	K			$4,1 \cdot 10^{14}$	0	0	$1,8 \cdot 10^{14}$	$4,6 \cdot 10^{12}$	$6,1 \cdot 10^{12}$
122 Container Typ II-V ^{a)}	K	ABK I	APG 01 – 06	$1,2 \cdot 10^{14}$	0	0	$5,4 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$
122 20'-Container	K	-	alle	$4,1 \cdot 10^{11}$	0	0	$1,8 \cdot 10^{11}$	$4,6 \cdot 10^9$	$6,1 \cdot 10^9$

^{a)} Beinhaltet auch Container Typ IV mit VKZ

4.3.1.2. Freigesetzte Aktivität

Die Freisetzunganteile 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 LasmA freigesetzte Aktivitäten (mechanische und thermische Belastung)

	AED	Behälter Typ II		Behälter Typ II	Gusscontainer Typ VI	Container Typ II		Container Typ II – V _{d)}	20'-Container
		APG 03		APG 01 – 06	FKZ	APG 03		APG 01 – 06	Alle
		A	K	K	K	A	K	K	K
		AGG 8	AGG 8	AGG 8	AGG 8	-	AGG 3	AGG 2	AGG 1
Freisetzungssanteile (BK 8)									
ARF ^{a)}	≤ 10 μm	0	2,2·10 ^{-4 b)}	2,2·10 ^{-4 b)}	2,2·10 ^{-4 b)}	0	3,0·10 ^{-4 c)}	0,3 ^{c)}	0,3 ^{c)}
	> 10 μm	0	0	0	0	0	6,0·10 ⁻⁶	6,0·10 ⁻⁴	6,0·10 ⁻⁴
Faktor für Gebäuderückhaltung									
LPF	≤ 10 μm	1							
	> 10 μm	1							
potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]									
ST (Co-60)	≤ 10 μm	0	8,4·10 ⁹	4,2·10 ⁹	2,5·10 ⁸	0	1,9·10 ⁹	9,5·10¹¹	9,5·10 ⁸
ST (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0	0
ST (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0	0
ST (Cs-137)		0	3,7·10 ¹⁰	1,8·10 ¹⁰	6,2·10 ⁹	0	1,3·10 ¹⁰	1,3·10¹³	1,3·10 ¹⁰
ST (Sr-90)		0	9,2·10 ⁷	4,6·10 ⁷	1,5·10 ⁷	0	2,1·10 ⁷	1,0·10¹⁰	11·10 ⁷
ST (Am-241)		0	1,2·10 ⁸	6,2·10 ⁷	8,6·10 ⁶	0	1,3·10 ⁷	4,2·10⁸	8,4·10 ⁴
ST (Gesamt)		0	4,6·10 ¹⁰	2,3·10 ¹⁰	6,4·10 ⁹	0	1,5·10 ¹⁰	1,4·10¹³	1,4·10 ¹⁰
ST (Co-60)	> 10 μm	0	0	0	0	0	5,7·10 ⁸	5,7·10¹⁰	5,7·10 ⁷
ST (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0	0
ST (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0	0
ST (Cs-137)		0	0	0	0	0	2,5·10 ⁸	2,5·10¹⁰	2,5·10 ⁷
ST (Sr-90)		0	0	0	0	0	6,4·10 ⁶	6,3·10⁸	6,3·10 ⁵
ST (Am-241)		0	0	0	0	0	8,4·10 ⁶	8,4·10⁸	1,7·10 ⁵
ST (Gesamt)		0	0	0	0	0	8,4·10 ⁸	8,4·10¹⁰	8,3·10 ⁷

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

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

	AED	Behälter Typ II		Behälter Typ II	Gusscontainer Typ VI	Container Typ II		Container Typ II – V ^{d)}	20'-Container
		APG 03		APG 01 – 06	FKZ	APG 03		APG 01 – 06	alle
		A	K	K	K	A	K	K	K
		AGG 8	AGG 8	AGG 8	AGG 8	-	AGG 3	AGG 2	AGG 1
Freisetzungsanteile (BK 2)									
<i>ARF</i> ^{a)}	≤ 10 μm	0	1,1·10 ^{-7 b)}	1,1·10 ^{-7 b)}	1,1·10 ^{-7 b)}	0	2,0·10 ^{-4 b)}	1,2·10 ^{-3 b)}	0,1 ^{b)}
	> 10 μm	0	0	0	0	0	1,0·10 ⁻⁷	1,0·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁵
Faktor für Gebäuderückhaltung									
<i>LPF</i>	≤ 10 μm	1							
	> 10 μm	1							
potentiell freigesetzte Aktivität [Bq]									
<i>ST</i> (Co-60)	≤ 10 μm	0	2,6·10 ⁶	7,1·10 ⁵	4,8·10 ⁵	0	8,3·10 ⁹	1,5·10¹⁰	4,1·10 ⁹
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	1,1·10 ⁷	3,1·10 ⁶	2,0·10 ⁶	0	3,7·10 ¹⁰	6,4·10¹⁰	1,8·10 ¹⁰
<i>ST</i> (Sr-90)		0	2,8·10 ⁴	7,8·10 ³	5,1·10 ³	0	9,3·10 ⁷	1,6·10⁸	4,6·10 ⁷
<i>ST</i> (Am-241)		0	3,8·10 ⁴	1,0·10 ⁴	7,0·10 ³	0	1,2·10 ⁸	2,2·10⁸	6,1·10 ⁷
<i>ST</i> (Gesamt)		0	1,4·10 ⁷	3,8·10 ⁶	2,5·10 ⁶	0	4,5·10 ¹⁰	7,9·10¹⁰	2,3·10 ¹⁰
<i>ST</i> (Co-60)	> 10 μm	0	0	0	0	0	4,1·10 ⁷	1,2·10⁹	4,1·10 ⁶
<i>ST</i> (Ni-63)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Fe-55)		0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ST</i> (Cs-137)		0	0	0	0	0	1,8·10 ⁷	5,4·10⁸	1,8·10 ⁶
<i>ST</i> (Sr-90)		0	0	0	0	0	4,6·10 ⁵	1,3·10⁷	4,6·10 ⁴
<i>ST</i> (Am-241)		0	0	0	0	0	6,1·10 ⁵	1,8·10⁷	6,1·10 ⁴
<i>ST</i> (Gesamt)		0	0	0	0	0	6,1·10 ⁷	1,8·10⁹	6,1·10 ⁶

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

Wie aus Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10 ersichtlich ist, sind die 20'-Container mit Mischabfällen durch die Container der Typen II – V der APG 01 – 06 abgedeckt. Dies liegt an der Vergleichbarkeit der Abfälle und am wesentlich kleineren zulässigen Aktivitätsinventar der 20'-Container. Da bei Einlagerung von 20'-Containern Stellplätze von Endlagergebänden belegt werden und somit

weniger dieser Endlagergebäude im LasmA vorhanden sind, ist eine Betrachtung konservativ, wenn nur Endlagergebäude eingelagert werden.

Die größten potentiell freigesetzten Aktivitäten ergeben sich für Container der Typen II – V der APG 01 – 06. Somit wird die Summe der in Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10 aufgeführten potentiell freigesetzten Aktivitäten für Container der Typen II – V der APG 01 – 06 bei den im Folgenden beschriebenen Ausbreitungs- und Dosisberechnungen als abdeckender Wert für die potentielle Freisetzung beim Absturz eines Militärflugzeugs mit Folgebrand verwendet.

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

Die Maximalwerte für Ausbreitungsfaktoren in den einzelnen Betrachtungsbereichen wurden wie in Abschnitt 3.5 beschrieben bestimmt. Dabei wurde eine thermische Überhöhung durch einen Wärmestrom von 0,5 MW verwendet. 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 unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Wettersituationen (gemäß der 4-parametrischen Statistik) 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.

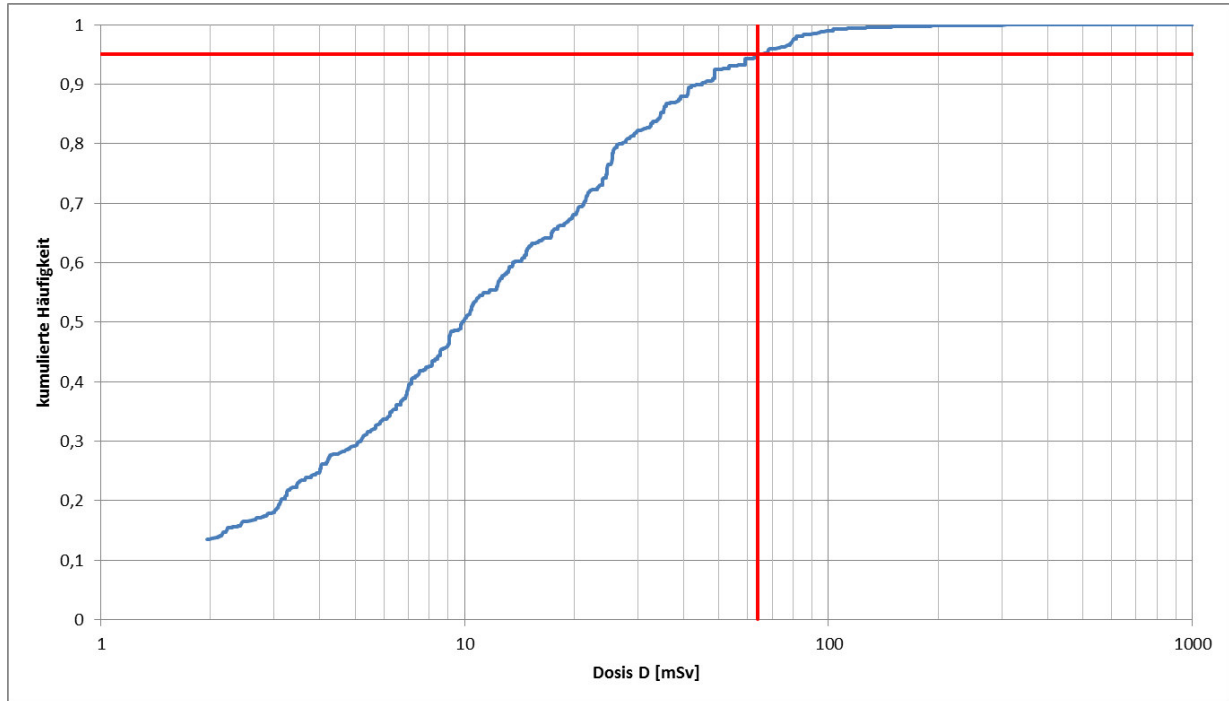


Abbildung 4-3: Histogramm der kumulierten Häufigkeit für die 1-Jahres-Folgedosis (Säuglinge) an Orten mit Wohnbebauung (Häufigkeit für effektive Dosis kleiner als D) mit Markierung für das 95 %-Quantil

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	3,4	63,9	5,1	30,7
1 – 2 a	4,6	61,6	7,9	32,2
2 – 7 a	5,1	54,8	9,1	30,5
7 – 12 a	6,6	52,5	12,1	32,5
12 – 17 a	7,3	46,8	13,8	31,2
> 17 a	8,2	44,2	16,0	30,8

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. Für den Fall mit Folgebrand wird eine thermische Überhöhung durch einen Wärmestrom von 0,5 MW verwendet.

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 γ -Bodenstrahlung verursacht. Die am höchsten belastete Altersgruppe ist die Altersgruppe der Säuglinge (≤ 1 a) mit einer effektiven Dosis aus äußerer Bestrahlung und Inhalation von 0,089 mSv für den Betrachtungszeitraum von 7 Tagen bzw. 4,2 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	γ -Bodenstrahlung		β -/ γ -Submersion + Inhalation		Äuß. Bestr. + Inhalation
		Entf. [km]	Dosis [mSv]	Entf. [km]	Dosis [mSv]	Dosis [mSv]
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	7 Tage	100	8,5E-2	100	4,1E-3	8,9E-2
Kleinkinder (1-2 Jahre)			8,0E-2		6,8E-3	8,7E-2
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			6,9E-2		7,7E-3	7,7E-2
Schulkinder (7-12 Jahre)			6,4E-2		1,1E-2	7,5E-2
Jugendliche (12-17 Jahre)			5,8E-2		1,2E-2	7,0E-2
Erwachsene (> 17 Jahre)			5,2E-2		1,4E-2	6,6E-2
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	1 Jahr	100	4,2	100	4,1E-3	4,2
Kleinkinder (1-2 Jahre)			4,0		6,8E-3	4,0
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)			3,4		7,7E-3	3,5
Schulkinder (7-12 Jahre)			3,2		1,1E-2	3,2
Jugendliche (12-17 Jahre)			2,9		1,2E-2	2,9
Erwachsene (> 17 Jahre)			2,6		1,4E-2	2,6

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 Co-60 im Mittel über alle Altersklassen zu etwa 38 % bei. Der Beitrag durch die restlichen Nuklide beläuft sich auf etwa 38 % (Cs-137) und 24 % (Am-241). Der Hauptanteil der Dosisbelastung wird für Säuglinge durch γ -Bodenstrahlung erzeugt, bei den Erwachsenen beträgt Inhalation fast genauso viel wie Bodenstrahlung. Für den Betrachtungszeitraum 1 Jahr liefert Co-60 mit 51 % als Mittelwert über alle Altersklassen den größten Anteil an der potentiellen Effektivdosis. Cs-137 liefert einen ähnlichen großen Anteil von etwa 49 %. Hier liefert die potentielle Exposition durch γ -Bodenstrahlung den Hauptbeitrag zur Dosisbelastung.

Die potentielle Exposition durch γ -Bodenstrahlung¹⁷ wird fast ausschließlich durch die Nuklide Co-60 (ca. 52 %) und Cs-137 (ca. 48 %) verursacht.

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 (≤ 1 Jahr)	7 Tage	6,4E-2	2,3E-2	3,9E-6	2,1E-3	8,9E-2
Kleinkinder (1-2 Jahre)		6,1E-2	2,2E-2	6,4E-6	3,7E-3	8,7E-2
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		5,3E-2	2,0E-2	7,2E-6	4,1E-3	7,7E-2
Schulkinder (7-12 Jahre)		4,9E-2	1,9E-2	8,6E-6	6,1E-3	7,5E-2
Jugendliche (12-17 Jahre)		4,6E-2	1,7E-2	9,8E-6	7,2E-3	7,0E-2
Erwachsene (> 17 Jahre)		4,2E-2	1,6E-2	1,1E-5	8,5E-3	6,6E-2
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	1 Jahr	3,1	1,1	3,9E-6	2,2E-3	4,2
Kleinkinder (1-2 Jahre)		2,9	1,0	6,4E-6	3,7E-3	4,0
Kindergartenkinder (2-7 Jahre)		2,5	0,91	7,2E-6	4,1E-3	3,5
Schulkinder (7-12 Jahre)		2,3	0,85	8,6E-6	6,2E-3	3,2
Jugendliche (12-17 Jahre)		2,1	0,72	9,8E-6	7,2E-3	2,9
Erwachsene (> 17 Jahre)		1,9	0,65	1,1E-5	8,5E-3	2,6

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 Arbeitsstätte mit 16 mSv die potentiell am höchsten belastete Altersgruppe. Bei Betrachtung der 1-Jahres-Folgedosis sind die Säuglinge (≤ 1 a) mit 63,9 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 $8,9 \cdot 10^{-2}$ mSv (7-Tage-Folgedosis) bzw. 4,2 mSv (1-Jahr-Folgedosis) die potentiell am höchsten belastete Altersgruppe.

Die ermittelten Expositionen zeigen, dass hier auch im auslegungüberschreitenden Fall des Absturzes eines Militärflugzeuges auf das LasmA keine Auswirkungen zu erwarten sind, die einschneidende Maßnahmen des Katastrophenschutzes erfordern würden.

¹⁷ Anteile der einzelnen Nuklide über die verschiedenen Altersgruppen gemittelt

5. QUELLEN

- [ATG 12] 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 5 Absatz 6 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- [BFS 10] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Oktober 2010) – Endlager Konrad –
Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung; SE-IB-29/08-REV-1
- [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 infolge von Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD) auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen (SEWD-Berechnungsgrundlage)“
vom 28. Oktober 2014; GMBI. 2014, Nr. 64, S. 1315

- [BS 06] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung des Kernkraftwerkes Brunsbüttel gemäß AVV zu § 47 Strahlenschutzverordnung aufgrund von Ableitungen mit der Luft im bestimmungsgemäßen Betrieb
BS-Projekt-Nr. 0603-06
Aachen, 13.04.2006
- [BS 13] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
Berechnung der potentiellen Strahlenexposition in der Umgebung des Kernkraftwerkes Brunsbüttel
BS-Projekt-Nr. 1310-01
Aachen, 04.06.2013
- [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 International Clean Air Congress, Washington 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 luftgetragener Partikel
Berlin: Beuth 1993
- [DOE 94] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY
DOE Handbook Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for Nonreactor Nuclear Facilities Volume I - Analysis of Experimental Data
DOE-HDBK-3010-94, 1994
- [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
- [GHI 09] GHILOUFI, IMED
Simulation of radioelement volatility during the vitrification radioactive wastes by arc plas-
ma
Journal of Hazardous Materials 163 (2009) 136 – 142
- [GIR 96] GIROLD, C ; CARTIER, R.; TAUPIAC, J. P.; VANDENSTEENDAM, C.; BARONNET, J. M.;
FLAMENT, T
Arc plasma incineration of surrogate radioactive wastes
In “Thermal Plasmas for hazardous Waste Treatment”, proceedings of the International
School of Plasma Physics “Piero Caldirola”; eds. R. Benocci, G. Bonizzoni, E. Sindoni;
World Scientific, 1996
- [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
- [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
- [KKB 12] KERNKRAFTWERK BRUNSBÜTTEL GMBH & CO. OHG
Antrag nach § 7 Abs. 3 AtG auf Stilllegung und Abbau
Schreiben an das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche
Räume des Landes Schleswig-Holstein
01.11.2012
- [KKB 14] KERNKRAFTWERK BRUNSBÜTTEL 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
05.05.2014

- [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
- [NRC 98] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION
Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook
NUREG / CR - 6410, 1998
- [NUK 15] NUKEM TECHNOLOGIES
Lasma – Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle am Standort des Kernkraftwerks Brunsbüttel
Sicherheitsbericht
LAB/010/010; Stand: Februar 2015
- [RIC 15] RICHTER, CORNELIA; SOGALLA, MARTIN, THIELEN, HARALD, MARTENS, REINHARD
ARTM – Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit der graphischen Benutzeroberfläche GO-ARTM – Programmbeschreibung zu Version 2.8.0 (GO-ARTM Version 2.0)
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, im Auftrag des Bundesamtes 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
- [SSK 03] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION
Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung 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 kerntechnischen Notfällen, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 37 (Vorabdruck), 2003

- [SSV 14] STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (STRLSCHV) IN DER FASSUNG VOM 20. JULI 2001
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutz-
verordnung - StrlSchV)
vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 5 der
Verordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010)
- [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
- [VAT 12] VATTENFALL EUROPE NUCLEAR ENERGY GMBH
Broschüre „Kernkraftwerk Brunsbüttel – Sicher und leistungsstark“
2012
- [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