



**Brenk  
Systemplanung**

Ingenieurgesellschaft für wissenschaftlich  
technischen Umweltschutz

Endbericht

**Ermittlung der  
radiologischen Auswirkungen  
von im Restbetrieb  
des Kernkraftwerks Brunsbüttel  
zu bewertenden Ereignissen**

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

erstellt im Auftrag der

Kernkraftwerk Brunsbüttel  
GmbH & Co. OHG  
Otto-Hahn-Straße 1  
25541 Brunsbüttel

durch die

Brenk Systemplanung GmbH  
Heider-Hof-Weg 23  
52080 Aachen

Aachen, 22.12.2015

*Rev. a.*

01140096632 /0024



**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



## ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht werden Störfälle und Restrisikoereignisse aus dem radiologisch relevanten Ereignisspektrum für das Kernkraftwerk Brunsbüttel (KKB) bewertet sowie die potentielle Strahlenexposition für Personen der allgemeinen Bevölkerung in der Umgebung des Kernkraftwerks ermittelt.

Dabei werden als Störfälle

- ein Brand in einem Container im Reaktorgebäude,
- der Absturz eines Containers im Reaktorgebäude sowie
- die Brennstabbeschädigung bei der Handhabung

betrachtet. Als radiologisch abdeckendes Ereignis für den in diesem Bericht betrachteten Teilumfang ergibt sich der Brand in einem Container, für den mit einer maximalen potentiellen effektiven Folgedosis von 0,31 mSv (Altersklassen bis 2 Jahre) die Grenzwerte nach § 49 eingehalten werden. Ebenso werden die Grenzwerte für alle Organdosen eingehalten.

Als Restrisikoereignis wird der Absturz eines Militärflugzeuges ohne und mit Folgebrand betrachtet. Hier überschreitet bei keiner der Altersgruppen die 7-Tage-Folgedosis sowie die 1-Jahr-Folgedosis 0,4 mSv. Dabei wird der größte Teil der potentiellen Dosis durch den Expositionspfad Inhalation verursacht und ist somit unabhängig vom Betrachtungszeitraum. Die berechneten potentiellen Expositionen liegen daher alle deutlich unterhalb der Eingreifrichtwerte für den Katastrophenschutz, somit sind keine Katastrophenschutzmaßnahmen mehr notwendig.



## INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

### ZUSAMMENFASSUNG

1. EINLEITUNG.....	1
2. BERECHNUNGS- UND BEWERTUNGSGRUNDLAGEN .....	2
2.1. Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung.....	2
2.2. Ausbreitungsmodell.....	3
2.2.1. Meteorologische Parameter .....	4
2.2.2. Ablagerungsfaktoren.....	4
2.2.3. Gelände- und Gebäudeeinfluss.....	5
2.2.4. Quellüberhöhung.....	5
2.3. Dosisberechnung.....	6
2.3.1. Expositionspfade.....	6
2.3.1.1. Störfälle .....	6
2.3.1.2. Ereignisse im Restrisikobereich .....	7
2.3.2. Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen.....	7
2.3.2.1. Lebensmittelverzehr zur Berücksichtigung bei Störfällen.....	7
2.3.2.2. Atemraten.....	8
2.3.2.3. Expositionszeiten bei Störfällen.....	8
2.3.2.4. Expositionszeiten bei Restrisikoereignissen .....	9
2.3.3. Dosiskoeffizienten der Bevölkerung.....	9
2.4. Bewertungsmaßstab für Störfälle .....	10
2.4.1. Planungswerte für die Dosis .....	10
2.4.2. Ungünstigste Aufpunkte.....	10
2.5. Bewertungsmaßstab für Ereignisse im Restrisikobereich .....	11
2.5.1. Eingreifrichtwerte für die Dosis.....	11
2.5.2. Ungünstigste Aufpunkte.....	12
3. STANDORTGEGEBENHEITEN .....	13
3.1. Lage und Gebäude.....	13
3.1.1. Gebäudeeinfluss und Zaunverlauf für Störfälle.....	13
3.1.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigster Aufpunkt bei einem Flugzeugabsturz.....	15
3.2. Betroffenes Aktivitätsinventar .....	15
3.2.1. Container.....	15
3.2.2. Defektstäbe.....	16
4. POTENTIELLE AUSWIRKUNGEN DER UNTERSUCHTEN STÖRFÄLLE .....	17
4.1. Brand in einem Container im Reaktorgebäude.....	17



4.1.1. Berechnung der Aktivitätsfreisetzung .....	17
4.1.2. Ausbreitungsberechnung .....	18
4.1.3. Ergebnisse der Dosisberechnung .....	19
4.2. Absturz eines Containers im Reaktorgebäude .....	21
4.3. Brennstabbeschädigung bei der Handhabung .....	22
4.3.1. Berechnung der Aktivitätsfreisetzung .....	22
4.3.2. Ausbreitungsberechnung .....	23
4.3.3. Ergebnisse der Dosisberechnung .....	24
5. POTENTIELLE AUSWIRKUNGEN EINES FLUGZEUGABSTURZ AUF DAS BRENNLEMENTLAGERBECKEN .....	25
5.1. Ermittlung der Quellterme .....	25
5.1.1. Definition des Restrisikoereignisses Flugzeugabsturz .....	25
5.1.2. Berstfreisetzung und Flugzeugabsturz ohne Brand .....	27
5.1.3. Flugzeugabsturz mit Brand .....	29
5.2. Ausbreitungsberechnung .....	31
5.3.2. Verdunstungs- und Verspritzungsfreisetzung ohne Brand .....	33
6. QUELLEN .....	36

## TABELLENVERZEICHNIS

Seite:

Tabelle 2-1:	Jahresverbrauch an Lebensmitteln der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Ingestion nach [SSK 03], Mengen in kg/a.....	8
Tabelle 2-2:	Atemraten der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Inhalation nach [SSK 03].....	8
Tabelle 2-3:	Planungswerte für Effektivdosis und Organdosen nach § 49 StrlSchV bei einem Störfall.....	10
Tabelle 2-4:	Eingreifrichtwerte bezüglich effektiver Dosis für bestimmte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationszeiten und Expositionspfade nach [SSK 03B] (Auszug).....	12
Tabelle 3-1:	Entfernungen vom Kamin zur Begrenzung des Überwachungsgebiets und des Betriebsgeländes in den 12 Sektoren für die jeweiligen Emissionspunkte in m (auf 10 m gerundet).....	15
Tabelle 3-2:	Bei Freisetzungen aus einem Container (durch Brand bzw. Absturz) verwendeter Nuklidvektor.....	16
Tabelle 3-3:	Aktivitätsinventar der 13 Defektstäbe [VAT 14].....	16
Tabelle 4-1:	Potentiell freigesetzte Aktivität beim Brand in einem Container im Reaktorgebäude.....	17
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung beim Brand in einem Container im Reaktorgebäude.....	18
Tabelle 4-3:	Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung beim Brand in einem Container im Reaktorgebäude.....	19
Tabelle 4-4:	Potentielle Organdosis am ungünstigsten Aufpunkt für die am höchsten belastete Altersklasse bis 1 Jahr.....	20
Tabelle 4-5:	Belastungsklassen und Freisetzungsanteile der AGG I für rein mechanische Beschädigungen in der Transportstudie Konrad [GRS 09] mit Angabe der Absturzhöhe eines Gebindes, die der Geschwindigkeit entspricht.....	21
Tabelle 4-6:	Potentielle Aktivitätsfreisetzung $SI$ aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken ( $IPF = 1, RF = 1$ ).....	22
Tabelle 4-7:	Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers (le: elementares Iod, Io: organisch gebundenes Iod).....	23
Tabelle 4-8:	Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken.....	24



Tabelle 4-9:	Potentielle Schilddrüsendosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers.....	24
Tabelle 5-1:	Quelltermberechnung für die Berstfreisetzung.....	28
Tabelle 5-2:	Quelltermberechnung für den Flugzeugabsturz ohne Brand (Summe).....	29
Tabelle 5-3:	Verdampfende Anteile am Beckenwasser für verschiedene Annahmen zu der zur Verfügung stehenden Verdampfungswärme.....	30
Tabelle 5-4:	Quelltermberechnung für den Flugzeugabsturz mit Brand.....	30
Tabelle 5-5:	Aus den Quelltermen und Überhöhungparametern abgeleitete Szenarien.....	31
Tabelle 5-6:	Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die Freisetzungsszenarien gemäß Tabelle 5-5.....	32
Tabelle 5-7:	Effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an den ungünstigsten Aufpunkten für die Berstfreisetzung.....	33
Tabelle 5-8:	Effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an den ungünstigsten Aufpunkten für die Verdunstungs-/Verspritzungsfreisetzung beim Flugzeugabsturz ohne Brand.....	34
Tabelle 5-9:	Effektive Dosis in mSv als Summe über die äußeren Pfade und die Inhalation an den ungünstigsten Aufpunkten für die Verdampfungsfreisetzung beim Militärflugzeugabsturz mit Brand.....	35



**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

	Seite:
Abbildung 3-1: Kernkraftwerk Brunsbüttel, Fotografie des Kraftwerks von Südwest nach Nordost [VAT 12].....	13
Abbildung 3-2: Darstellung des Anlagengeländes mit Lage des geplanten Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle (Lasma).....	14



## **I. EINLEITUNG**

Im Kernkraftwerk Brunsbüttel (KKB) wurde bis zum 18. Juli 2007 ein Siedewasserreaktor (806 MW<sub>el</sub>) zur Erzeugung von Elektrizität betrieben. Mit Inkrafttreten der 13. Atomgesetz-Novelle am 6. August 2011 ist für KKB die Berechtigung zum Leistungsbetrieb erloschen. Damit ging KKB in die Nachbetriebsphase über.

Am 01.12.2012 hat KKB bei der zuständigen Genehmigungsbehörde (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein) die Genehmigung für Stilllegung und Abbau des KKB beantragt [KKB 12]. Darin wird erklärt, dass KKB beabsichtigt, die beim Abbau anfallenden radioaktiven Abfälle für eine Endlagerung vorzubereiten und am Standort bis Abgabe an ein Bundesendlager zwischenzulagern.

Ein wichtiger Schritt in der Nachbetriebsphase ist die Herstellung der Brennstofffreiheit der Anlage. Das bedeutet, der Kernbrennstoff wird komplett aus dem Reaktor und dem Brennelementnasslagerbecken entfernt und in den dafür vorgesehenen Gebinden (CASTOR<sup>®</sup>-Behälter) in das Standortzwischenlager (SZB) verbracht. Gemäß der Antragslage können sich jedoch 13 einzelne Defektstäbe noch in der Anlage befinden. Es wurde geprüft, welche radiologische Relevanz für mögliche betriebliche Ableitungen mit der Fortluft sowie für die Störfall- und Notfallplanung ein Verbleib dieser 13 Defektstäbe in der Anlage hat. Hierfür werden folgende Szenarien betrachtet:

1. Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken und Bewertung hinsichtlich der Planungswerte nach § 49 StrlSchV für Aktivitätsabgaben mit der Fortluft und
2. Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Flugzeugabsturz auf das Brennelementlagerbecken und Bewertung der ermittelten potentiellen Exposition hinsichtlich der Eingreifrichtwerte für den Katastrophenschutz an der nächstgelegenen Wohnbebauung.

Als weitere Störfälle im Sinne der §§ 49 und 50 der StrlSchV werden der Absturz eines Containers sowie der Brand in einem Container im Reaktorgebäude betrachtet.

Das für den Restbetrieb der Anlage radiologisch relevante Spektrum für Störfälle und Restrisikoereignisse wird vollständig in der Ereignisanalyse für das KKB dargestellt.

In Kapitel 2 dieses Berichts werden die verwendeten Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen erläutert. Dabei wird insbesondere auf die Unterschiede im Vorgehen bei den Störfällen „Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken“, „Brand in einem Container im Reaktorgebäude“ sowie „Absturz eines Containers im Reaktorgebäude“ und dem Restrisikoereignis „Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Flugzeugabsturz auf das Brennelementlagerbecken“ eingegangen.

In Kapitel 3 dieses Berichts werden die für Quelltermmittlung sowie Ausbreitungs- und Dosisberechnungen bedeutsamen Standortgegebenheiten, insbesondere das betroffene Aktivitätsinventar und die Lage der Gebäude am Standort, beschrieben.

In den Kapiteln 4.3 („Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken“) und 5 („Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Flugzeugab-

sturz auf das Brennelementlagerbecken“) werden Ergebnisse der Quelltermmittlung sowie der Ausbreitungs- und Dosisberechnungen dargestellt.

## 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 Ereignisse „Brand in einem Container im Reaktorgebäude“, „Absturz eines Containers im Reaktorgebäude“ und „potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken“ sind dabei als Störfall im Sinne der §§ 49 und 50 StrlSchV einzuordnen. Das Szenario „Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Flugzeugabsturz auf das Brennelementlagerbecken“ ist hingegen als Restrisikoereignis anzusehen. Für alle drei Einzelschritte der Expositionsberechnung existiert hierbei eine Vielzahl von Gemeinsamkeiten. Darum werden die Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen im Allgemeinen dargestellt. Auf Unterschiede in der Vorgehensweise wird an den entsprechenden Stellen explizit verwiesen.

Bei den Bewertungsgrundlagen werden beide Vorgehensweisen dagegen getrennt dargestellt.

### 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 jeweiligen Ereignis gefährdet ist, der Faktor *DR* beschreibt den beim Ereignis beschädigten Anteil. Je nach betrachtetem Ereignis 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.“*

Details zur Ermittlung der Aktivitätsfreisetzung werden in den jeweiligen Abschnitten der einzelnen Ereignisse beschrieben.

Berechnungsgrundlagen für Störfälle bei Druckwasserreaktoren wurden in den Störfallberechnungsgrundlagen [BMI 83] festgelegt. Insbesondere werden dort die zu betrachtenden Szenarien definiert und Parameter zur Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung bei diesen Szenarien festgelegt.

Für die in diesem Bericht zu betrachtende potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken ist die Vorgehensweise aus [BMI 83] auch auf die Gegebenheiten des KKB (Siedewasserreaktor im Restbetrieb) anwendbar. Die Regularien in [BMI 83] werden unter Verwendung anlagenspezifischer Parameter angepasst.

Die Ermittlung des Quellterms für das Restrisikoereignis erfolgt ebenfalls unter Verwendung von Vorgaben aus [BMI 83].

## **2.2. Ausbreitungsmodell**

Gemäß [SSK 03] ist bei der Ermittlung der Strahlenexposition für Ausbreitungsberechnungen das Gauß-Fahnenmodell zugrunde zu legen. Details des Gauß-Fahnenmodells sind in [SSK 03] Abschnitt 4.4 sowie Anhang 2 bis 10 aufgeführt.

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

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

### 2.2.1. Meteorologische Parameter

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

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

Diese Vorgehensweise ist konservativ, da ungünstige Randbedingungen überlagert werden, die bei Berücksichtigung realer Wetterverhältnisse am Standort nicht relevant wären.

### 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  $v_g$ :

$$W = A_f \cdot v_g \quad (G 2-2)$$

Den nuklidabhängigen Washoutfaktor für bestimmte Niederschlagsintensitäten erhält man aus dem Washoutkoeffizient  $\Lambda_0$ , der Niederschlagsintensität  $I$  in mm/h und der Niederschlagsintensität  $I_0 = 1$  mm/h nach der Formel:

$$\Lambda = \Lambda_0 \cdot \left(\frac{I}{I_0}\right)^k \quad (G 2-3)$$

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

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

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

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

### 2.2.3. Gelände- und Gebäudeeinfluss

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

Wenn das Gelände am Standort - wie im vorliegenden Fall - nahezu eben ist, braucht ein Einfluss des Geländes auf die Ausbreitungsverhältnisse nicht gesondert berücksichtigt zu werden.

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

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

$$h' = 0,5 \cdot [3 \cdot H - (H_G + I_G)] \quad \text{für } H_G \leq H \leq 2 \cdot H_G \quad (\text{G 2-4})$$

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

Eine Reduzierung der Emissionshöhe führt bei sonst gleichen Parametern in den Ausbreitungsrechnungen unter den gegebenen Bedingungen zur Erhöhung der bodennahen Konzentration und damit auch zur Erhöhung des Falloutfaktors. Der Washoutfaktor wird durch die Berücksichtigung von Gebäuden nicht direkt<sup>2</sup> beeinflusst, da bei dessen Berechnung eine vertikale Summierung über die komplette Ausbreitungsschicht auftritt, so dass vertikale Vermischungen keinen Einfluss haben.

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

$$\sigma'_y = \sqrt{\sigma_y^2 + \frac{I_G^2}{\pi}}, \quad \sigma'_z = \sqrt{\sigma_z^2 + \frac{I_G^2}{\pi}} \quad (\text{G 2-5})$$

zu korrigieren.

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

### 2.2.4. Quellüberhöhung

Die aus einem Kamin austretende Abluft steigt auf Grund ihres mechanischen Impulses in die Atmosphäre empor. Ein thermischer Auftrieb ergibt sich, wenn die Abluft gegenüber der umgebenden Luft eine höhere Temperatur besitzt, was insbesondere bei Bränden vorkommt. Mit der VDI-

<sup>2</sup> Eine indirekte Beeinflussung ist dann gegeben, wenn die tatsächliche Emissionshöhe größer als 50 m und die korrigierte Emissionshöhe kleiner als 180 m ist. Hier werden für die korrigierte Emissionshöhe gemäß [SSK 03] Anhang 3 veränderte Ausbreitungskoeffizienten und Exponenten berechnet.

Richtlinie 3782 Blatt 3 [VDI 85] können Quellüberhöhungen berechnet werden. Es wird dort 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 Restrisikoereignis „Flugzeugabsturz“ ist ein Kerosinbrand mit erheblichen Wärmeleistungen zu erwarten. Daher werden die Berechnungsvorschriften für „warme Quellen“ aus [VDI 85] verwendet, die identisch mit den Berechnungsvorschriften in [SSK 03] sind.

### **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 [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 folgenden sechs Altersgruppen gemäß Anlage VII Teil B der StrlSchV betrachtet:

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

#### **2.3.1. Expositionspfade**

##### **2.3.1.1. Störfälle**

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

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

Für den Expositionspfad Ingestion werden die Teilpfade

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

- Luft - Nahrung - Muttermilch

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

#### **2.3.1.2. Ereignisse im Restrisikobereich**

Hierfür werden die Expositionspfade gemäß [SSK 03] berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.3.1.1), mit Ausnahme des Ingestionspfads. Es 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 unterbindet.

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

##### **2.3.2.1. Lebensmittelverzehr zur Berücksichtigung bei Störfällen**

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

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

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

In [SSK 03] Anhang 1 Tabelle 2 sind gemäß Anlage VII Teil B Tabelle 1 StrlSchV [SSV 14] die den Dosisberechnungen zugrunde zu legenden Verzehrsmengen für die verschiedenen Lebensmittelarten der sechs Altersgruppen angegeben. In diesem Anhang heißt es: „Zur Berücksichtigung der 95 % Perzentile der jährlichen Verzehrsmengen der Referenzpersonen sind die mittleren jährlichen Verzehrsmengen mit den Faktoren der Spalte 8 zu multiplizieren“. Diese Faktoren sind gemäß [BMU 00] so gewählt, „d. h. dass bei einer Multiplikation mit dem Mittelwert annähernd der 95-Perzentilwert der Verzehrrate der jeweiligen Nahrungsmittelgruppe abgedeckt wird“.

Die mit den Faktoren der Spalte 8 aus der o. g. Tabelle multiplizierten jährlichen Verzehrsmengen, die so für die nachfolgenden Dosisabschätzungen verwendet werden, sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Jahresverbrauch an Lebensmitteln der Referenzpersonen zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch Ingestion nach [SSK 03]. Mengen in kg/a.

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

### 2.3.2.2. Atemraten

Gemäß [SSK 03] Anhang 1 Tabelle 3 sind nachfolgende altersgruppenabhängige Atemraten (Tabelle 2-2) zur Berechnung der Inhalationsdosis zugrunde zu legen.

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

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

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

Für Restrisikoereignisse wird das gleiche Vorgehen angewandt

### 2.3.2.3. Expositionszeiten bei Störfällen

Bei der Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch äußere Bestrahlung und Inhalation wird angenommen, dass sich die exponierten Personen während des gesamten Durchzugs der Abfuhrung ungeschützt<sup>1</sup> im Freien aufhalten.

<sup>1</sup> Ungeschützt heißt in dem Zusammenhang, dass die Referenzperson der jeweiligen Exposition direkt ausgesetzt ist und keine Abschirmwirkung beim Aufenthalt in Gebäuden berücksichtigt wird.



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

#### **2.3.2.4. Expositionszeiten bei Restrisikoereignissen**

Bei der Ermittlung der Exposition durch Bodenstrahlung werden verschiedene Aufenthaltszeiten betrachtet. Diese entsprechen dabei den Betrachtungszeiträumen zur Beurteilung der Notwendigkeit von Katastrophenschutzmaßnahmen (siehe Abschnitt 2.5.1, Tabelle 2-4).

Es wird analog zum Vorgehen beim Störfall die potentielle Dosis durch äußere Bestrahlung und Inhalation für eine Person, die sich während des gesamten Durchzugs der Abluftfahne und der betrachteten Dauer der Einwirkung der Bodenstrahlung ungeschützt<sup>4</sup> im Freien aufhält, ermittelt. Bei Wohnbebauungen ist dabei von Daueraufenthalt auszugehen.

Als Zeitmaßstab für die Beurteilung der Notwendigkeit kurzfristiger Maßnahmen (Aufenthalt in Gebäuden, Evakuierung) werden 7 Tage verwendet. Für längerfristig angelegte Maßnahmen ist der Betrachtungszeitraum auf 1 Monat (temporäre Umsiedlung) bzw. 1 Jahr (dauerhafte Umsiedlung) festgelegt. Auf die Betrachtung des 1-Monats-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 Restrisikoereignis werden daher nur die radiologischen Modellierungen und ein Vergleich mit den entsprechenden Eingreifrichtwerten der Tabelle 2-4 für die 7-Tage- und 1-Jahr-Folgedosis durchgeführt.

#### **2.3.3. Dosiskoeffizienten der Bevölkerung**

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

- die Inhalation,
- die Ingestion (nur Störfälle),
- die  $\gamma$ -Submersion,
- die  $\gamma$ -Bodenstrahlung und
- die  $\beta$ -Submersion

benötigt. Die Strahlenschutzverordnung [SSV 14] verweist für die Dosiskoeffizienten auf [BMU 01]. Diese dort enthaltenen Dosiskoeffizienten werden für die Dosisberechnungen der vorliegenden Untersuchung angewendet.

<sup>4</sup> Schutzwirkungen durch Aufenthalt in Gebäuden soll hier nicht betrachtet werden, um die Anwendbarkeit der Bewertungsmaßstäbe zu gewährleisten

## 2.4. Bewertungsmaßstab für Störfälle

### 2.4.1. Planungswerte für die Dosis

Für Kernkraftwerke im Restbetrieb sind die §§ 49 und 50 der StrlSchV relevant.

Gemäß § 50 Abs. 1 StrlSchV sind „(...) bei der Planung von anderen als in § 49 genannten Anlagen nach § 7 Abs. 1 des Atomgesetzes (...) bauliche oder technische Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung des potenziellen Schadensausmaßes zu treffen, um die Strahlenexposition bei Störfällen durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung zu begrenzen. Die Genehmigungsbehörde legt Art und Umfang der Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung des Einzelfalls, insbesondere des Gefährdungspotenzials der Anlage und der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Störfalls, fest.“

Weiter wird in § 50 Abs. 2 StrlSchV ausgeführt: „Absatz 1 gilt auch für die Stilllegung, den sicheren Einschluss der endgültig stillgelegten Anlagen und den Abbau der Anlagen oder von Anlagenteilen nach § 7 Abs. 3 Satz 1 des Atomgesetzes.“

Gemäß § 117 Abs. 16 StrlSchV gilt: „Bis zum Inkrafttreten allgemeiner Verwaltungsvorschriften zur Störfallvorsorge nach § 50 Abs. 4 ist bei Planung der in § 50 Abs. 1 bis 3 genannten Anlagen und Einrichtungen die Störfallexposition so zu begrenzen, dass die durch Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung verursachte effektive Dosis von 50 Millisievert nicht überschritten wird.“. Da diese allgemeinen Verwaltungsvorschriften bislang nicht vorliegen, ist dieser Bewertungsmaßstab zu Grunde zu legen.

Gemäß § 49 StrlSchV gelten für den ungünstigsten Störfall die in Tabelle 2-3 angegebenen Grenzwerte für die durch Freisetzung radioaktiver Stoffe resultierende Dosis. Es werden die gemäß Anlage VII StrlSchV zu berücksichtigenden Altersklassen betrachtet.

Tabelle 2-3: Planungswerte für Effektivdosis und Organdosen nach § 49 StrlSchV bei einem Störfall

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

Bezugnehmend auf die hier dargestellten Ausführungen in § 50 StrlSchV werden im vorliegenden Bericht die Planungswerte nach § 49 StrlSchV als Bewertungsmaßstab herangezogen.

### 2.4.2. Ungünstigste Aufpunkte

Hinsichtlich der ungünstigsten Einwirkungsstellen sind gemäß [SSK 03] „(...) die Stellen zugrunde zu legen, an denen sich die höchste effektive Dosis oder die höchsten Organdosen ergeben. Dabei

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

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

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

Im Einzelfall können zwei oder alle drei Orte identisch sein.

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

## **2.5. Bewertungsmaßstab für Ereignisse im Restrisikobereich**

### **2.5.1. Eingreifrichtwerte für die Dosis**

Die tatsächliche Strahlenexposition bei Restrisikoereignissen wird nicht allein auf der Basis von Ausbreitungs- und Dosisrechnungen, sondern überwiegend auf der Basis von Messungen nach Eintritt des Ereignisses ermittelt. Modellgestützte Betrachtungen geben jedoch einen Anhaltspunkt, ob vom Restrisikoereignis 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 unterbindet. Die Expositionszeiten sind in Kap. 2.3.2.4 dargestellt.

Bei langfristig angelegten Maßnahmen ist allerdings zu berücksichtigen, dass solche nur anhand realer Situationen (Messwerte der Ortsdosisleistung) entschieden werden könnten, da die bei den Berechnungen zugrunde liegenden Methoden mit erheblichen Konservativitäten behaftet sind.

Die Betrachtungszeiträume und Eingreifrichtwerte<sup>5</sup> gemäß [SSK 03B] sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst.

Tabelle 2-4: Eingreifrichtwerte bezüglich effektiver Dosis für bestimmte Maßnahmen und die zugehörigen Integrationszeiten und Expositionspfade 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

Tatsächliche Eingreifwerte können gemäß [SSK 03B] über den Eingreifrichtwerten aus Tabelle 2-4 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 2-4 sind aus Strahlenschutzgründen alleine nicht gerechtfertigt.

### **2.5.2. Ungünstigste Aufpunkte**

Als ungünstigster Aufpunkt 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.

Im vorliegenden Fall wird auf eine Verwendung von standortbezogenen meteorologischen Daten verzichtet und es erfolgt keine richtungsabhängige Berücksichtigung von Gebäudeinflüssen. Die Entfernung des ungünstigsten Aufpunkts ergibt sich daher aus der Entfernung der zum Emissionsort nächstgelegenen Bebauung.

<sup>5</sup> Auf die Berücksichtigung von Eingreifrichtwerten für die durch Inhalation von Iod-Isotopen verursachte Schilddrüsensendosis kann hier verzichtet werden, zur 1-Monat-Folgedosis siehe Abschnitt 2.3.2.4.

### 3. STANDORTGEGEBENHEITEN

#### 3.1. Lage und Gebäude

Der Standort des Kernkraftwerks befindet sich in unmittelbarer Elbnähe ca. 3,0 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 3-2 stellt das Kraftwerksgelände dar.

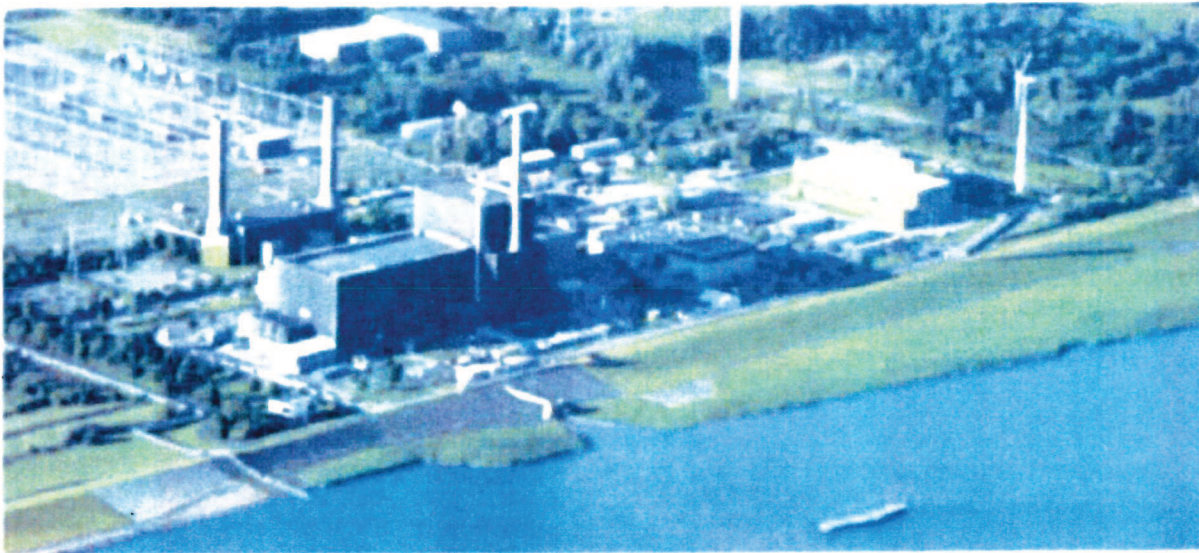


Abbildung 3-1: Kernkraftwerk Brunsbüttel. Fotografie des Kraftwerks von Südwest nach Nordost [VAI 12]

Für die größeren Gebäude auf dem Gelände des KKB muss dagegen von einer Beeinflussung der Ausbreitungsverhältnisse ausgegangen werden. Die horizontale Ausdehnung der Gebäude kann Abbildung 3-2 entnommen werden, ebenso die Lokalisierung der Emissionsquellen. Gemäß [SSK 03] Anhang 7 ist beim Gebäudeeinfluss sowohl die effektive Gebäudehöhe ( $H_e$ ) als auch der niedrigere Wert aus effektiver Gebäudehöhe und effektiver Gebäudebreite ( $H_e$ ) zu berücksichtigen.

#### 3.1.1. Gebäudeeinfluss und Zaunverlauf für Störfälle

Für eine Freisetzung über den Fortluftkamin beeinflusst das Reaktorgebäude mit einer Höhe von 60 m und einer effektiven Breite von 30 m für Anströmungen aus Nord-Süd-Richtung bzw. 40 m bei Anströmungen aus Ost-West-Richtung die Ausbreitung. Die Höhe des anschließenden Maschinenhauses liegt mit 36 m deutlich niedriger, die effektive Breite für Anströmungen aus Ost-West-Richtungen entspricht der des Reaktorgebäudes. Das Gaskraftwerk liegt ca. 140 m vom Emissionspunkt entfernt, es ist damit außerhalb der Reichweite einer Gebäudebeeinflussung gemäß [SSK 03], Anhang 7 gelegen. Dies gilt bezüglich Entfernung, horizontaler Ausdehnung (siehe Abbildung 3-2) und Gebäudehöhe (ca. 16 m) ebenso für das geplante Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle

(LasmA). Als effektive Gebäudehöhe wird ein Wert von 60 m und als effektive Gebäudebreite ein Wert von 30 m für alle Sektoren als konstant angenommen.

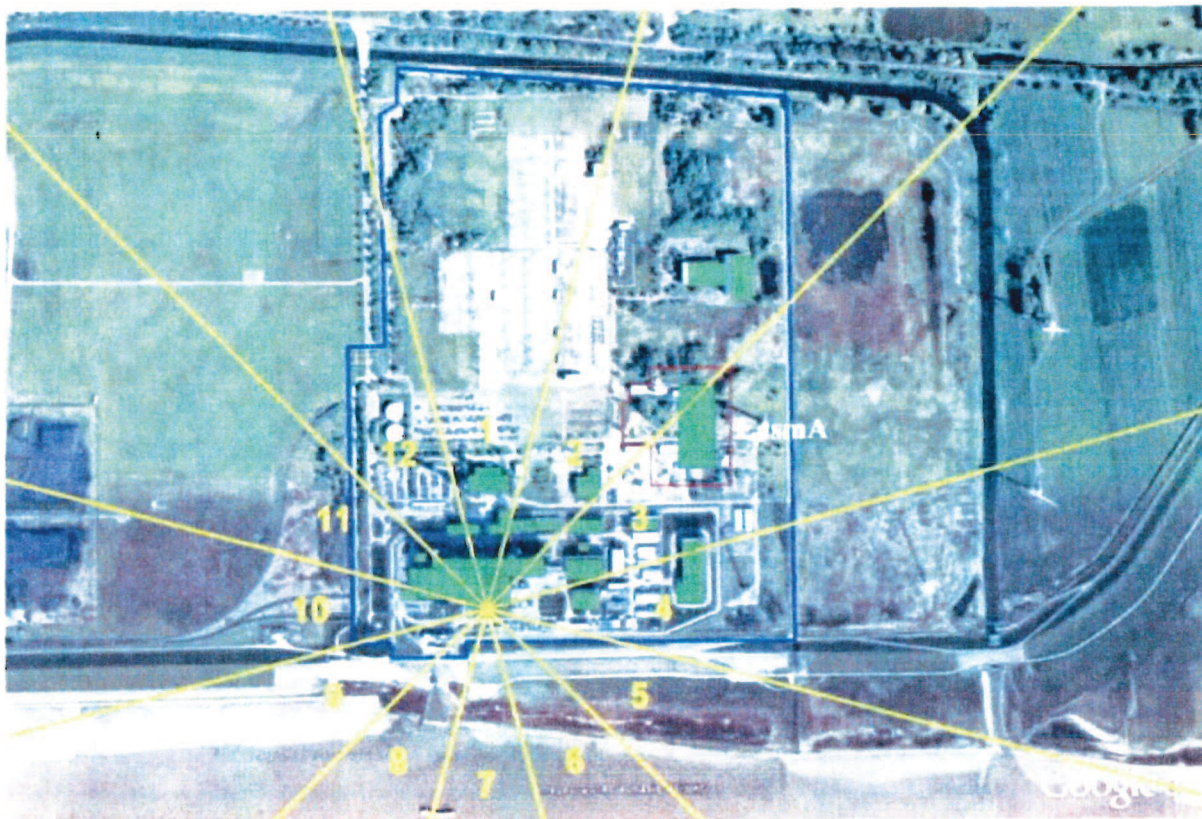


Abbildung 3-2. Darstellung des Anlagengeländes mit Lage des geplanten Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle (LasmA)

Die Anlage ist vom sogenannten Massivzaun umgeben (siehe blaue Markierung in Abbildung 3-2). Dieser Zaun stellt die Grenze des Überwachungsbereichs dar. Der Bereich zwischen dem Kraftwerk im Süden und dem Elbufer ist zwar öffentlich zugänglich, allerdings hinsichtlich der möglichen Aufenthaltsdauer eingeschränkt. Diese Einschränkungen werden aber konservativ im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt. In Tabelle 3-1 sind die Entfernungen der einzelnen Emissionspunkte zum Zaun sektorweise angegeben.

Tabelle 3-1: Entfernungen vom Kamin zur Begrenzung des Überwachungsgebiets und des Betriebsgeländes in den 12 Sektoren für die jeweiligen Emissionspunkte in m (auf 10 m gerundet)

Sektor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Richtung des Sektors in [°]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Entfernung der Begrenzung des Überwachungsbereichs zum Kamin	750	830	500	430	100	50	50	50	140	190	220	390

### 3.1.2. Gebäudeeinfluss und ungünstigster Aufpunkt bei einem Flugzeugabsturz

Gemäß Abschnitt 5.1.1 dieses Berichts wird eine vollständige Zerstörung des Reaktorgebäudes durch die Absturzereignisse nicht angenommen. Das beschädigte Reaktorgebäude mit einer Höhe bis zur Oberkante des Nasslagerbeckens (Höhe über GOK 39 m) und einer effektiven Breite von 30 m bleibt bestehen und beeinflusst die Ausbreitung. Die Höhe des anschließenden Maschinenhauses liegt mit 36 m nahezu auf gleichem Niveau, die effektive Breite in Richtung Emissionspunkt entspricht der des Reaktorgebäudes.

Die nächstgelegene Wohnbebauung befindet sich in ca. 1.400 m Entfernung vom Kamin in ost-nordöstlicher Richtung (Sektor 3) in der Ortschaft Büttel. Diese Entfernung wird für den zu berücksichtigenden ungünstigsten Aufpunkt angesetzt. Auf Grund der Verwendung generischer meteorologischer Daten und der richtungsunabhängigen Gebäudeeinflussparameter ist die Richtung der nächsten Wohnbebauung ohne Bedeutung.

Zusätzlich wird die Inhalationsdosis beim Durchzug der Wolke am ungünstigsten Aufpunkt betrachtet. Für Szenarien ohne thermische Überhöhung bei der Freisetzung ergibt sich dieser analog zu Abschnitt 3.1.1 direkt am Zaun (Sektor 6, 50 m Entfernung). Für Szenarien mit thermischer Überhöhung bei der Freisetzung ergibt sich dieser in sehr großen Entfernungen (siehe Abschnitt 5.2). Der Beitrag zur Gesamtexposition ist in diesem Fall bedeutungslos.

## 3.2. Betroffenes Aktivitätsinventar

### 3.2.1. Container

Für den von einem Absturz oder Brand betroffenen Container wird von einem Aktivitätsinventar von  $5 \cdot 10^9$  Bq ausgegangen. Für den bei der Bestimmung der freigesetzten Nuklidanteile benötigten Nuklidvektor wird auf den im 2. Teil des FSK-Stresstests [FSK 13] verwendeten Nuklidvektor für Zwischenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus Betrieb, Stilllegung und Abbau von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren mit einem Anteil von 70 % Co-60 und 30 % Cs-137 zurückgegriffen. Zusätzlich zu den beiden Nukliden nach [FSK 13] wird als typisches alpha-Nuklid Am-241 mit einem Anteil von 0,1 % berücksichtigt und Sr-90 als 2,5 %-Bruchteil des Cs-137-Anteils angesetzt. Damit ergibt sich der in Tabelle 3-2 angegebene Nuklidvektor.

Tabelle 3-2: Bei Freisetzungen aus einem Container (durch Brand bzw. Absturz) verwendeter Nuklidvektor

Nuklid	Anteil	Aktivität [Bq]
Co-60	69,41 %	$3,47 \cdot 10^9$
Cs-137	29,75 %	$1,49 \cdot 10^9$
Sr-90	0,74 %	$3,72 \cdot 10^7$
Am-241	0,10 %	$4,96 \cdot 10^6$
Summe	100 %	$5 \cdot 10^9$

### 3.2.2. Defektstäbe

In [VAT 14] wurde die Nuklidzusammensetzung der einzelnen Stäbe unter Berücksichtigung der Leistungsgeschichte der Brennelemente, in denen die Stäbe zum Einsatz kamen, mit Stand 01.01.2014 berechnet. Die im Leistungsbetrieb relevanten Iod-Isotope sind aufgrund der langen Standzeit und kurzer Halbwertszeiten bereits zerfallen (z. B. I-131 mit 8 Tagen) und müssen in den hier betrachteten Szenarien nicht mehr berücksichtigt werden. Das berechnete Aktivitätsinventar in Summe über alle 13 Defektstäbe ist in Tabelle 3-3 angegeben. Die Auswahl beschränkt sich dabei auf radiologisch relevante<sup>6</sup> Nuklide. Die Aktivitätsangaben in [VAT 14] berücksichtigen nicht, dass aus den Defektstäben das Edelgas Kr-85 ggf. schon entwichen ist. Das angegebene Aktivitätsinventar wird zur Quelltermmittlung in allen für die Defektstäbe betrachteten Ereignissen verwendet.

Tabelle 3-3: Aktivitätsinventar der 13 Defektstäbe [VAT 14]

Nuklid <sup>a)</sup>	Aktivitätsinventar in 13 Defektstäben (01.01.2014) [Bq]
Sr-90 (Gleichgewicht mit Y-90)	$4,55 \cdot 10^{11}$
Cs-134	$2,30 \cdot 10^{12}$
Cs-137 (nahezu Gleichgewicht mit Ba-137m)	$6,29 \cdot 10^{13}$
Pu-238	$1,52 \cdot 10^{12}$
Pu-239	$3,51 \cdot 10^{11}$
Pu-240	$4,59 \cdot 10^{11}$
Pu-241	$4,12 \cdot 10^{11}$
Am-241	$2,27 \cdot 10^7$
Cm-244	$6,78 \cdot 10^7$
Kr-85	$2,78 \cdot 10^7$
I-129	$2,48 \cdot 10^7$
Summe gemäß [VAT 14]	$2,68 \cdot 10^{13}$

zusätzlich zu den hier aufgeführten radiologisch relevanten Nukliden wurden in den Berechnungen alle weiteren in [VAT 14] angegebenen Nuklide berücksichtigt

Für den Störfall sind dabei auf Grund des Freisetzungsszenarios die Nuklide I-129 und Kr-85 relevant, für das Restrisikoereignis die anderen angegebenen Nuklide.



## 4. POTENTIELLE AUSWIRKUNGEN DER UNTERSUCHTEN STÖRFÄLLE

### 4.1. Brand in einem Container im Reaktorgebäude

#### 4.1.1. Berechnung der Aktivitätsfreisetzung

Es wird, basierend auf der bisherigen Betriebserfahrung, die hier auch auf die Aktivitäten bei Stilllegung und Abbau anwendbar ist, von einem Container ausgegangen (siehe [BS 15]), in dem brennbare Mischabfälle gelagert sind, die aus ca. 50 cm × 50 cm × 30 cm großen, in Plastikfolie verpackten, Paketen bestehen. Für vergleichbare, kontaminierte feste Reststoffe sind Freisetzungsteile in [DOE 94] verfügbar. Hier wird für „verpackten Mischabfall“, zu dem auch mit Klebeband verschlossene Plastiksäcke gerechnet werden, ein  $ARF$ -Wert von  $5 \cdot 10^{-4}$  und ein  $RF$ -Wert von 1 angegeben. Bei unverpacktem Zellstoff werden  $ARF = 1 \cdot 10^{-2}$  und  $RF = 1$  angegeben. Für alle Arten von Plastik, außer Polystyrol, werden  $ARF = 5 \cdot 10^{-2}$  und  $RF = 1$  sowie für Polystyrol  $ARF = 1 \cdot 10^{-2}$  und  $RF = 1$  als abdeckende Werte aufgeführt.

Zum Vergleich mit den Freisetzungsteilen aus den Behältern nach [GRS 09] werden im Folgenden konservativ die Behälter mit der geringsten Rückhaltewirkung betrachtet (Abfallgebindegruppe AGG 1) und die Belastungsklasse mit der geringsten mechanischen und höchsten thermischen Belastung (eine Stunde Branddauer) angesetzt. Somit ergibt sich die Belastungsklasse BK 3. Die Freisetzungsteile gemäß [GRS 09] beziehen sich für Belastungsklassen mit Brand ausdrücklich auf das leichtflüchtige Element Cs. Für andere Elemente sind hier Korrekturen notwendig. Diese Korrekturen für andere Elemente werden auf Basis der Ergebnisse in [BOE 06] angesetzt. Für Co und Am wird daher der  $ARF$ -Wert bei einem AED bis 10 µm für thermische Belastungen aus [GRS 09] mit einem Faktor 0,01 korrigiert und der  $ARF$ -Wert für Sr mit einem Faktor 0,1.

Zur weiteren konservativen Betrachtung wird der  $ARF$ -Wert aus [GRS 09] mit den Korrekturen gemäß [BOE 06] als Basis herangezogen. Der dort aufgeführte  $ARF$ -Wert von  $1 \cdot 10^{-1}$  für die Freisetzung von Cs ist abdeckend für die weiteren zitierten Werte. Eine Differenzierung hinsichtlich der unterschiedlichen Freisetzbarkeit der weiteren betrachteten Nuklide ist geboten. Es wird keine weitere Rückhaltewirkung durch Gebäude oder Filter unterstellt. Mit den Aktivitäten nach Tabelle 3-2 (Abschnitt 3.2.1) ergeben sich die in Tabelle 4-1 angegebenen potentiell freigesetzten Aktivitäten.

Tabelle 4-1: Potentiell freigesetzte Aktivität beim Brand in einem Container im Reaktorgebäude

Nuklid	Anteil	Aktivität [Bq]	ARF		freigesetzte Aktivität [Bq]	
			bis 10 µm	ab 10 µm	bis 10 µm	ab 10 µm
Co-60	69,41 %	$3,47 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^6$
Cs-137	29,75 %	$1,49 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$
Sr-90	0,74 %	$3,72 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^5$
Am-241	0,10 %	$4,96 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^3$
Summe	100 %	$5 \cdot 10^9$			$1,5 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^7$

#### 4.1.2. Ausbreitungsberechnung

Der Emissionsort wird auf den Abluftkamin gelegt. Die Freisetzungen werden als impuls- und wärmelose Quellen<sup>7</sup> betrachtet. Als Freisetzungsdauer wird nach [SSK 03] konservativ der Zeitraum bis 8 h angenommen. Die Parameter für den Gebäudeeinfluss (Modellansatz siehe Abschnitt 2.2.3) wurden folgendermaßen angenommen: Freisetzungshöhe (Kamin)  $H$ : 100 m, Gebäudehöhe  $H_g$ : 60 m, Parameter  $I_g^0$ : 30 m.

Für die Freisetzung wurde die ungünstigste Ausbreitungssituation und die Lage der ungünstigsten Aufpunkte unter Beachtung der in Abschnitt 2.2 aufgeführten meteorologischen Randbedingungen außerhalb des Überwachungsbereichs ermittelt. Die sektorweisen Entfernungen der Grenze des Überwachungsbereichs vom Emissionsort wurden aus Tabelle 3-1 entnommen.

Für den Störfall sind nur die Expositionspfade Ingestion und  $\gamma$ -Bodenstrahlung sowie zu einem geringen Teil der Expositionspfad Inhalation radiologisch relevant. Es werden die Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter für die folgenden Expositionspfade angegeben:

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

In Tabelle 4-2 sind die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen und Aufpunkte und die dortigen, dosisrelevanten Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter angegeben.

Tabelle 4-2. Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung beim Brand in einem Container im Reaktorgebäude

AED	AK	$\gamma$ -Bodenstrahlung		Inhalation		Ingestion	
		AP <sup>2)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>b</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>b)</sup>	AP <sup>2)</sup>	A <sub>f</sub> [s/m <sup>3</sup> ] <sup>c)</sup>	AP <sup>2)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>pl</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>d)</sup>
0 – 10 $\mu$ m	1	6 / 50	4,3 · 10 <sup>-7</sup>	3 / 600	8,8 · 10 <sup>-7</sup>	6 / 50	1,3 · 10 <sup>-6</sup>
10 – 100 $\mu$ m			1,8 · 10 <sup>-7</sup>				5,5 · 10 <sup>-7</sup>

<sup>a)</sup> AP: Aufpunkt, Sektor | Entfernung [m]  
<sup>b)</sup> W<sub>f</sub>: Ablagerungsfaktor für den Boden [1/m<sup>2</sup>]  
<sup>c)</sup> A<sub>f</sub>: Ausbreitungsfaktor [s/m<sup>3</sup>]  
<sup>d)</sup> W<sub>f</sub><sup>pl</sup>: Ablagerungsfaktor für Pflanzen [1/m<sup>2</sup>]

<sup>7</sup> Zum einen kühlen sich die potentiell über die Abluft freigesetzten Brandabgase ab, so dass eine Überhöhnung nur schwer parametrisierbar ist. Zum anderen ist eine Nichtberücksichtigung der thermischen Überhöhnung konservativ und das betrachtete Szenario kann damit als abdeckend für Fälle mit geringerer Aktivitätsfreisetzung ohne thermische Einwirkungen angenommen werden.

<sup>8</sup> kleinerer Wert aus Gebäudehöhe und Gebäudebreite (siehe Abschnitt 2.2)

Der Ablagerungsfaktor auf dem Boden ist dabei beim Expositionspfad Ingestion nicht gesondert angegeben, wenn beim Expositionspfad  $\gamma$ -Bodenstrahlung derselbe ungünstige Aufpunkt ermittelt wurde.

Die Angaben zu Sektor und Entfernung beziehen sich dabei jeweils auf den Emissionspunkt als Nullpunkt des Polarkoordinatensystems.

Die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen ergeben sich für die betrachtete Freisetzung mit Diffusionskategorie C verbunden mit 5 mm/h Niederschlag. Aufpunkte in der Elbe wurden wegen nicht vorhandener Möglichkeit des Anbaus ausgeschlossen. Der Aufpunkt in Sektor 6 bei einer Entfernung von 50 m liegt am Massivzaun zwischen der Anlage und der Elbe, der Aufpunkt in Sektor 3 in 600 m Entfernung nordöstlich des LasmA am Massivzaun.

#### 4.1.3. Ergebnisse der Dosisberechnung

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

Es wurden alle gemäß Abschnitt 2.3.1 zu betrachtenden Expositionspfade in die Berechnung mit einbezogen. Die Ergebnisse der Berechnung zur effektiven Dosis sind in Tabelle 4-3 nuklidspezifisch für die betrachteten Altersgruppen angegeben.

Tabelle 4-3: Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung beim Brand in einem Container im Reaktorgebäude

AED	Nuklid	Effektive Dosis [mSv]					
		$\leq 1$ a	$> 1 - \leq 2$ a	$> 2 - \leq 7$ a	$> 7 - \leq 12$ a	$> 12 - \leq 17$ a	$> 17$ a
0 - 10 $\mu$ m	Co-60	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-1}$	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-1}$
	Cs-137	0,31	0,30	0,30	0,28	0,27	0,26
	Sr-90	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$
	Am-241	$7,3 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$
	Summe	0,31	0,31	0,30	0,29	0,28	0,26
10-100 $\mu$ m	Co-60	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$
	Cs-137	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
	Sr-90	$6,9 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \cdot 10^{-1}$	$5,9 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-1}$
	Am-241	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$
	Summe	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
0 - 100 $\mu$ m	Co-60	$6,5 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$
	Cs-137	0,31	0,30	0,30	0,28	0,27	0,26
	Sr-90	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$
	Am-241	$7,6 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$
	Summe	0,31	0,31	0,30	0,29	0,28	0,26

Für alle Altersklassen wird die potentielle Exposition nahezu vollständig durch Cs-137 und Partikel mit einem AED bis 10 µm verursacht. Die höchste Exposition ergibt sich dabei für die Altersklassen zwischen 0 und 2 Jahre mit 0,31 mSv.

Die Ergebnisse für die potentiellen Organdosen der am höchsten belasteten Altersklasse bis 1 Jahr sind in Tabelle 4-4 angegeben. Die höchste Ausschöpfung der potentiellen Exposition ergibt sich für die Effektivdosis mit 0,6 % des zu Grunde gelegten Planungswertes von 50 mSv gemäß § 49 StrlSchV.

**Tabelle 4-4:** Potentielle Organdosis am ungünstigsten Aufpunkt für die am höchsten belastete Altersklasse bis 1 Jahr

Organ	Potentielle Dosis [mSv]							Aus- sch.
	γ- Boden	γ-Subm.	β-Subm.	Inhal.	Subm. und Inhal.	Ing.	Summe	
ET Luftwege	0,26	$3,7 \cdot 10^{-8}$	0	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	0,34	0,23%
Lunge	0,25	$3,2 \cdot 10^{-8}$	0	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-2}$	0,32	0,22%
Blase	0,23	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,21%
Brust	0,26	$3,4 \cdot 10^{-8}$	0	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	0,33	0,22%
Gehirn	0,24	$3,7 \cdot 10^{-8}$	0	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,21%
Haut	0,27	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	0,34	0,07%
Hoden	0,24	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,62%
Knochenoberfläche	0,25	$3,4 \cdot 10^{-8}$	0	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,11	0,36	0,12%
Leber	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,20%
Speiseröhre	0,21	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,29	0,19%
Magen	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,21%
Dünndarm	0,22	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	0,30	0,20%
Oberer Dickdarm	0,22	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,21%
Unterer Dickdarm	0,22	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	0,12	0,34	0,23%
Dickdarm	0,22	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	0,10	0,32	0,21%
Milz	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,20%
Muskel	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$7,7 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	0,30	0,20%
Nebennieren	0,22	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	0,30	0,20%
Nieren	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,20%
Ovarien	0,22	$2,5 \cdot 10^{-8}$	0	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	0,30	0,61%
Pankreas	0,21	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	0,29	0,20%
Rotes Knochenmark	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	0	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,62%
Schilddrüse	0,26	$3,7 \cdot 10^{-8}$	0	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	0,34	0,23%
Thymus	0,24	$3,2 \cdot 10^{-8}$	0	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,21%
Uterus	0,21	$2,5 \cdot 10^{-8}$	0	$6,1 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$	0,29	0,58%
Augenlinse	0	0	$7,9 \cdot 10^{-11}$	0	$7,9 \cdot 10^{-11}$	0	$7,9 \cdot 10^{-11}$	0,00%
Effektive Dosis	0,23	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	0,31	0,63%

#### 4.2. Absturz eines Containers im Reaktorgebäude

Es wird der Absturz eines Containers mit Mischabfällen während der Handhabung im Reaktorgebäude betrachtet. Die Freisetzungsteile aus dem Container können entweder [GRS 09] oder [DOE 94] entnommen werden. Für die Freisetzungsteile nach [GRS 09] werden konservativ die Behälter mit der geringsten Rückhaltewirkung verwendet (Abfallgebindegruppe AGG 1). Der Energieeintrag der mechanischen Einwirkungen wird in [GRS 09] durch die in Tabelle 4-5 angegebenen Geschwindigkeitsklassen charakterisiert. Für die Belastungsklasse 1 (BK 1) wird eine Aufprallgeschwindigkeit im Intervall von 0 bis 35 km/h unterstellt. Eine Aufprallgeschwindigkeit von 35 km/h entspricht einem freien Fall aus ca. 4,8 m Höhe. Diese Fallhöhe kann als abdeckend für einen Containerabsturz im Reaktorgebäude angesehen werden.

Tabelle 4-5: Belastungsklassen und Freisetzungsteile der AGG 1 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]	korrespondierende Fallhöhe [m]	ARF für AGG 1	
				0 – 10 µm	10 – 100 µm
BK 1	≤ 35	35	4,8	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
BK 4	36 – 80	80	25,2	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
BK 7	> 80	120	47,6	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Zusätzlich sind in Tabelle 4-5 auch die Freisetzungsteile der AGG 1 für die jeweilige mechanische Belastungsklasse angegeben.

Bei den Freisetzungsteilen nach [DOE 94] wird nicht nach Belastungsklassen unterschieden, sondern abdeckend von einem heftigen Aufprall ausgegangen. Bei leicht oder nicht verpackten kontaminierten Stoffen wird eine Kombination von  $ARF = 10^{-5}$  und  $RF = 1$  angegeben. Für relativ robuste Verpackungen werden  $ARF = 10^{-3}$  und  $RF = 0,1$  als abdeckende Werte aufgeführt. Beim Vergleich mit [GRS 09] muss noch berücksichtigt werden, dass der  $ARF$ -Wert für Partikel mit einem AED bis 10 µm nach [GRS 09] dem Produkt  $ARF \cdot RF$  nach [DOE 94] entspricht. Es ist festzustellen, dass die  $ARF$ -Werte aus [DOE 94] in derselben Größenordnung wie die  $ARF$ -Werte aus [GRS 09] für BK 7 liegen und beide Ansätze daher in diesem Bereich konsistent sind.

Da das unterstellte betroffene Aktivitätsinventar für einen Container dasselbe ist wie für den Fall des Containerbrandes im Gebäude und die Freisetzungsteile der radiologisch relevanten Partikel mit einem AED bis 10 µm sowohl für alle Belastungsklassen nach [GRS 09] als auch für die nach [DOE 94] betrachteten Fälle um Größenordnungen kleiner sind als im Fall eines Brandes (Freisetzungsteil  $1 \cdot 10^{-1}$ ; siehe Abschnitt 4.1.1), wird der Absturz eines Containers nicht weiter betrachtet.

### 4.3. Brennstabbeschädigung bei der Handhabung

#### 4.3.1. Berechnung der Aktivitätsfreisetzung

Für den Störfall „Potentielle Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken“ wird unterstellt, dass bei Handhabungen (z. B. Beräumung des Beckens, Trocknung etc.) durch Versagen des Hebezeugs die 13 noch vorhandenen Defektstäbe beschädigt werden. Das Aktivitätsinventar der 13 Defektstäbe (Faktor  $MR$  gemäß (G 3-1)) wird aus Tabelle 3-3 übernommen. Für das hier untersuchte Freisetzungsszenario sind gemäß [BMI 83] dabei Iod-Isotope und Edelgase relevant. Die im Leistungsbetrieb relevanten Iod-Isotope sind aufgrund der langen Standzeit und kurzer Halbwertszeiten bereits zerfallen (z. B. I-131 mit 8 Tagen) und müssen daher nicht mehr berücksichtigt werden, nur das Isotop I-129 mit einer Halbwertszeit von  $1,6 \cdot 10^7$  Jahren ist für die folgenden Betrachtungen relevant.

Es wird unterstellt, dass die Beschädigung außerhalb des Beckenwassers erfolgt. Diese Annahme ist unrealistisch, da die Handhabung der Defektstäbe nur mit einer hohen Wasserüberdeckung im Becken erfolgt. Der gemäß [BMI 83] anzusetzende Anteil von 5 % des Iod-Inventars (Faktor  $ARF$  gemäß (G 3-1) = 0,05) gelangt so direkt in die Atmosphäre des Reaktorgebäudes. Es wird gemäß [BMI 83] ein Anteil von 90 % (Faktor  $DR$  gemäß (G 3 1) = 0,9) an elementarem I-129 und ein Anteil von 10 % (Faktor  $DR$  gemäß (G 3 1) = 0,1) an organischem I-129 angesetzt.

Für das Edelgas Kr-85 wird unterstellt, dass dieses komplett in die Atmosphäre des Reaktorgebäudes gelangt (Faktor  $ARF$  gemäß (G 3-1) = 1,0). Es wird dabei konservativ nicht berücksichtigt, dass Kr-85 aus den Defektstäben ggf. schon entwichen ist. Unter diesen konservativen Annahmen wird eine maximal mögliche potentielle Freisetzung von  $2,8 \cdot 10^{12}$  Bq Kr-85 ermittelt, die nicht radiologisch relevant ist.

Für die Freisetzung aus der Atmosphäre des Reaktorgebäudes in die Anlagenumgebung wird angenommen, dass die Fortluftanlage des Reaktorgebäudes in Betrieb ist und die Freisetzung ungefiltert erfolgt. Die gesamte, potentiell in die Atmosphäre des Reaktorgebäudes freigesetzte Aktivität gelangt somit über den Fortluftkamin in die Anlagenumgebung. Der Faktor  $LPF$  gemäß (G 3-1) wird demnach auf 1,0 gesetzt.

Der Faktor  $RF$  wird hier für die Ermittlung der Freisetzungsterme zu 1 gesetzt, da auch Expositionspfade (z. B.  $\gamma$ -Bodenstrahlung) betrachtet werden, bei denen die Lungengängigkeit der Aerosole nicht relevant ist und diese den Hauptbeitrag zur Dosis darstellen.

Die Parameter der Quelltermmittlung gemäß (G 3-1) und die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tabelle 4-6. Potentielle Aktivitätsfreisetzung  $ST$  aus 13 Defektstäben bei Absturz des Köchers im Brennelementlagerbecken ( $LPF = 1$ ,  $RF = 1$ )

Nuklid	$MR$ [Bq]	$DR$	$ARF$	$ST$ [Bq]
I-129, elementar	$2,48 \cdot 10^6$	0,9	0,05	$1,1 \cdot 10^6$
I-129, organisch	$2,48 \cdot 10^6$	0,1	0,05	$1,2 \cdot 10^5$
Kr-85	$2,78 \cdot 10^{12}$	1,0	1,0	$2,8 \cdot 10^{12}$

### 4.3.2. Ausbreitungsberechnung

Der Emissionsort wird auf den Abluftkamin gelegt. Die Freisetzungen werden als impuls- und wärmelose Quellen betrachtet. Als Freisetzungsdauer wird nach [SSK 03] konservativ der Zeitraum bis 8 h angenommen. Die Parameter für den Gebäudeeinfluss (Modellansatz siehe Abschnitt 2.2.3) wurden folgendermaßen angenommen: Freisetzungshöhe (Kamin)  $H$ : 100 m, Gebäudhöhe  $H_g$ : 60 m, Parameter  $I_g^0$ : 30 m.

Für die Freisetzung wurde die ungünstigste Ausbreitungssituation und die Lage der ungünstigsten Aufpunkte unter Beachtung der in Abschnitt 2.2 aufgeführten meteorologischen Randbedingungen außerhalb des Überwachungsbereichs ermittelt. Die sektorweisen Entfernungen der Grenze des Überwachungsbereichs vom Emissionsort wurden aus Tabelle 3-1 entnommen.

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

$\gamma$ -Bodenstrahlung: Ablagerungsfaktor auf dem Boden, berechnet als Summe des Falloutfaktors und des Washoutfaktors,

Inhalation: Ausbreitungsfaktor

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

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

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die potentielle Freisetzung aus 13 Defektstellen bei Abwurf des Kessels (e: elementares Iod, fo: organisch gebundenes Iod)

AK	$\gamma$ -Bodenstrahlung		Inhalation		Ingestion	
	AP <sup>a)</sup>	$W_f^b$ [ $1/m^2$ ] <sup>b)</sup>	AP <sup>a)</sup>	$A_f$ [ $s/m^3$ ] <sup>c)</sup>	AP <sup>a)</sup>	$W_f^{pf}$ [ $1/m^2$ ] <sup>d)</sup>
C	6-50	le: $4,3 \cdot 10^7$ fo: $4,3 \cdot 10^8$	3-500	$8,4 \cdot 10^7$	6-50	le: $1,3 \cdot 10^7$ fo: $1,3 \cdot 10^8$

<sup>a)</sup> AP: Aufpunkt, Sektor, Entfernung [m]  
<sup>b)</sup>  $W_f^b$ : Ablagerungsfaktor für den Boden [ $1/m^2$ ]  
<sup>c)</sup>  $A_f$ : Ausbreitungsfaktor [ $s/m^3$ ]  
<sup>d)</sup>  $W_f^{pf}$ : Ablagerungsfaktor für Pflanzen [ $1/m^2$ ]

<sup>a)</sup> Kleinerer Wert aus Gebäudehöhe und Gebäudebreite, siehe Abschnitt 2.2

Die ermittelten ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen ergeben sich für die betrachtete Freisetzung mit Diffusionskategorie C verbunden mit 5 mm/h Niederschlag. Aufpunkte in der Elbe wurden wegen nicht vorhandener Möglichkeit des Anbaus ausgeschlossen. Der Aufpunkt in Sektor 6 bei einer Entfernung von 50 m liegt am Massivzaun zwischen der Anlage und der Elbe, der Aufpunkt in Sektor 3 in 500 m Entfernung nordöstlich des LasmA am Massivzaun.

### 4.3.3. Ergebnisse der Dosisberechnung

Aus den in Abschnitt 4.3.1 berechneten Freisetzungsraten und den in Abschnitt 4.3.2 berechneten Ausbreitungs- und Ablagerungsparametern wurde die Effektivdosis für die 6 Altersgruppen berechnet. Diese Berechnungen erfolgten jeweils separat für die freigesetzten Nuklide.

Es wurden alle gemäß Abschnitt 2.3.1 zu betrachtenden Expositionspfade in die Berechnung mit einbezogen. Die Ergebnisse der Berechnung zur effektiven Dosis sind in Tabelle 4-8 nuklidspezifisch angegeben.

Tabelle 4-8: Potentielle effektive Dosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Kóchers im Brennelementlagerbecken

Nuklid	Effektive Dosis [mSv]					
	≤ 1 a	> 1 – ≤ 2 a	> 2 – ≤ 7 a	> 7 – ≤ 12 a	> 12 – ≤ 17 a	> 17 a
I-129 elementar	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$	$3,06 \cdot 10^{-3}$	$3,06 \cdot 10^{-3}$	$2,64 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$
I-129 organisch	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$9,78 \cdot 10^{-6}$	$9,07 \cdot 10^{-6}$	$7,92 \cdot 10^{-6}$	$6,99 \cdot 10^{-6}$
Kr-85	$5,97 \cdot 10^{-6}$	$5,92 \cdot 10^{-6}$	$5,68 \cdot 10^{-6}$	$5,44 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-6}$
Summe	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$3,07 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$

Die Ergebnisse der Berechnung zur Schilddrüsensdosis sind in Tabelle 4-9 angegeben, die potentielle Dosis wird fast ausschließlich vom elementaren I-129 verursacht.

Tabelle 4-9: Potentielle Schilddrüsensdosis am ungünstigsten Aufpunkt für die Freisetzung aus 13 Defektstäben bei Absturz des Kóchers

Nuklid	Effektive Dosis [mSv]					
	≤ 1 a	> 1 – ≤ 2 a	> 2 – ≤ 7 a	> 7 – ≤ 12 a	> 12 – ≤ 17 a	> 17 a
Summe	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$

In allen Fällen liegt die potentielle Exposition mit 0,058 mSv weit unterhalb der zu Grunde gelegten Planungswerte gemäß § 49 StrlSchV (50 mSv für die Effektivdosis, 150 mSv für die Schilddrüsensdosis). Für die nicht angegebenen Organdosen werden die Planungswerte zu noch geringerem Anteil ausgeschöpft.



## **5. POTENTIELLE AUSWIRKUNGEN EINES FLUGZEUGABSTURZ AUF DAS BRENNELEMENTLAGERBECKEN**

### **5.1. Ermittlung der Quellterme**

#### **5.1.1. Definition des Restrisikoereignisses Flugzeugabsturz**

Für die Abschätzung der Folgen des Flugzeugabsturzes sind prinzipiell Annahmen über das Schadensausmaß, einen möglichen Treibstoffbrand, den Zustand der Gebäude und die örtliche Verteilung der Trümmer von Flugzeug und radioaktivem Inventar sowie von Kerosin nötig. Für das Schadensausmaß ist eine breite Streuung in Abhängigkeit von den getroffenen Gebäudeteilen sowie von Anflugrichtung, Geschwindigkeit und Masse des Flugzeugs und seines Resttreibstoffs zu erwarten.

Für die hier anzunehmende Situation müssen für eine Abschätzung der mechanischen Schäden obige Überlegungen stark vereinfacht werden. Als auslösendes Ereignis wird der Absturz eines Militärflugzeugs<sup>10</sup> unterstellt. Eine Zerstörung des Beckens mit ca. 1,5 m dicken Außenwänden aus Beton wird nicht unterstellt. Es wird vielmehr angenommen, dass das abstürzende Flugzeug die Gebäudestruktur des Reaktorgebäudes über dem Lagerbecken beschädigt und möglicherweise durchschlägt und die dabei entstehenden Trümmer von Flugzeug und Gebäude Schaden im Nasslagerbecken anrichten.

Es wird abdeckend angenommen, dass alle Brennstäbe soweit mechanisch beschädigt werden, dass eine Freisetzung von Inventar in das Wasser und direkt in die Umgebungsluft erfolgt (Anteil analog [BMI 83] Abschnitt 3.1.6).

Ein Auslaufen des Wassers aus dem Nasslagerbecken wird nicht angenommen. Die angenommene maximal verdampfende Wassermenge liegt deutlich unter der des Beckeninhalts (siehe Abschnitt 5.1.3), so dass die Defektstäbe wasserbedeckt bleiben. Ein Aufheizen der Defektstäbe ist daher nicht zu unterstellen.

Die Situation bezüglich des Treibstoffbrands stellt sich differenzierter dar. Tanks und Flügel eines Flugzeugs sind wenig stabil, es ist daher möglich, dass sie an der ersten Barriere abreißen und das Kerosin zu einem großen Anteil nicht mit dem Nasslagerbecken in Kontakt kommt. Die Tanks des Flugzeugs können vor dem Absturz voll oder leer sein. Als maximal vorhandene Treibstoffmenge werden 5 Mg angenommen. Dies entspricht ungefähr der Treibstoffmenge eines vollbetankten Flugzeugs vom Typ Phantom II F-4E, Tomado IDS oder Eurofighter Typhoon (jeweils ohne externe Zusatztanks).

Der Treibstoffbrand kann zwei verschiedene Ausprägungen aufweisen, einen Feuerball und einen Lachenbrand. Ein Feuerball tritt vorzugsweise auf, wenn ein Flugzeug auf ein festes Ziel auftrifft. Dabei verteilt sich das Kerosin in kleinen Tropfen und verbrennt durch den innigen Kontakt mit der Luft sehr schnell. Es kommt zu geringem Kontakt des Kerosins mit der Auftrefffläche und zu einer nur kurzzeitigen, oberflächlichen Aufheizung. Ein Lachenbrand tritt vorzugsweise auf, wenn ein Flugzeug ein nachgebendes Ziel trifft. Dabei sammelt sich das Kerosin am Boden in einer Lache

<sup>10</sup> Dies wird im Folgenden an einigen Stellen im Text vereinfachend als Flugzeug bezeichnet.

und verbrennt langsam. Es kommt zum direkten Kontakt zwischen Trümmern und Kerosin und zu einer längerfristigen tiefer gehenden Aufheizung der Trümmer. Diese Aufheizung bewirkt das Verdampfen eines Teils des Wassers im Nasslagerbecken. Es ist zu erwarten, dass im Ereignisfall unterschiedliche Ausprägungen der beiden Brandformen auftreten.

Der Treibstoffbrand hat zwei wesentliche Auswirkungen. Einerseits wird durch das Verdampfen von flüchtigen Substanzen und durch die Thermik die Freisetzung insgesamt und in der Folge die Exposition erhöht. Andererseits transportiert der thermische Auftrieb die freigesetzten Stoffe in größere Höhen und reduziert damit die maximale Exposition. Es kann deswegen nicht a priori entschieden werden, ob ein Szenario mit Treibstoffbrand oder ein Szenario ohne Treibstoffbrand abdeckend ist.

Es werden daher zwei Szenariengruppen betrachtet:

- Szenario ohne Treibstoffbrand: Dieses Szenario deckt auch solche Szenarien ab, bei denen sich ein Brand ohne räumlichen Zusammenhang mit dem Nasslagerbecken entwickelt. Die Beschädigungsrate der Defektstäbe wird mit 100 % angenommen.
- Szenarien mit Treibstoffbrand: Es wird von einer Mischform zwischen Feuerball und Lachenbrand ausgegangen. Es wird unterstellt, dass nur ein Teil des Wassers verdampft und es nicht zu starker Hitzeeinwirkung auf die Defektstäbe kommt. Der Anteil der Verbrennungswärme, der zur Aufheizung/Verdampfung von Wasser führt, kann für die anzunehmende Mischform des Brandes nicht hinreichend genau parametrisiert werden. Es wird daher eine Parametervariation durchgeführt.

Die betroffene Aktivität (Produkt der Faktoren  $MR$  und  $DR$  gemäß G 3-1) ist demnach aus Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Effektive Werte für den Faktor  $ARF$  gemäß G 3-1 werden in den einzelnen Szenarien (siehe Abschnitte 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3) in Abhängigkeit des jeweiligen Freisetzungsmechanismus berechnet.

Eine Rückhaltung durch das beschädigte Gebäude wird vereinfachend nicht unterstellt. Die gesamte, potentiell in die Atmosphäre des Reaktorgebäudes freigesetzte Aktivität gelangt demnach in die Anlagenumgebung. Der Faktor  $LPF$  gemäß (G 3-1) wird daher auf 1,0 gesetzt.

Der Faktor  $RF$  wird hier für die Ermittlung der Freisetzungsterme zu 1 gesetzt, da auch Expositionspfade (z. B.  $\gamma$ -Bodenstrahlung) betrachtet werden, bei denen die Lungengängigkeit der Aerosole nicht relevant ist und da insbesondere bei der Freisetzung von wassergebundenen Aerosolen eher von kleinen Partikelgrößen auszugehen ist.

Die hier vorgestellte Methodik zur Ermittlung der potentiellen Aktivitätsfreisetzung beim Flugzeugabsturz wurde ursprünglich in [BS 06] angewandt. In diesem Bericht wurden die Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes auf das Bremsenlagerbecken unter Berücksichtigung möglicher Beladungen während des Leistungsbetriebs ermittelt. Die Ergebnisse aus [BS 06] wurden mit [TUV 09] gutachterlich bestätigt. In [BS 12] wurden die Berechnungen aus [BS 06] für die Nachbetriebsphase aktualisiert.

### 5.1.2. Berstfreisetzung und Flugzeugabsturz ohne Brand

In diesem Szenario wird der Absturz eines Flugzeugs auf das Reaktorgebäude angenommen, wobei es nicht zu einem Treibstoffbrand kommt. Teile der Flugzeug- und Gebäudetrümmer treffen das Nasslagerbecken. Es wird konservativ unterstellt, dass 100 % der Defektstäbe beschädigt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass es bei der Beschädigung der Defektstäbe zur direkten Freisetzung der leicht flüchtigen Spaltprodukte (Berstfreisetzung) kommt. Durch herabfallende Trümmer kann eine Aufwirbelung der Wasserschicht stattfinden, welche die Defektstäbe überdeckt. In [BMI 83] Abschnitt 3.1.1 sind Parameter für eine Berstfreisetzung angegeben. Allerdings bezieht sich dieses Szenario auf den Fall eines Brennelementversagens bei Kühlmittelverlusten, welches mit hohen Temperaturen einhergeht. Für den hier vorliegenden Fall wird aufgrund der niedrigeren Temperatur für die Berstfreisetzungsrates der Feststoffe (inkl. Halogene und Alkalimetalle) ein gegenüber [BMI 83] Abschnitt 3.1.1 reduzierender Faktor von 0,01 angesetzt. Die Edelgasfreisetzung wird als temperaturunabhängig betrachtet.

Weiterhin kommt es zu einer Lösung von Spaltprodukten aus den beschädigten Defektstäben ins Wasser. In [BMI 83] Abschnitt 3.1.1 (Kühlmittelverlust, hohe Temperatur) und 3.1.6 (Handhabungsstörfall BE Beschädigung) sind entsprechende Parameter angegeben.

Ein Teil des durch die Beschädigung der Defektstäbe kontaminierten Wassers verdunstet auch bei niedrigen Temperaturen oder verspritzt und Aerosole bzw. Iod gehen in die Luft über. Die entsprechenden Parameter für den Übergang werden [BMI 83] Abschnitt 3.1.8 entnommen.

Folgende Parameter zur Beschreibung der Vorgänge wurden verwendet:

- Berstfreisetzung aus den Defektstäben in die Atmosphäre (gemäß [BMI 83] 3.1.1)
  - Freisetzungsanteile aus den betroffenen Defektstäben:
    - Edelgase/Tritium 10 %
    - Halogene/Alkalimetalle 0,01 % (Faktor 0,01 wegen geringerer Temperatur)
    - sonstige Feststoffe 0,0001 % (Faktor 0,01 wegen geringerer Temperatur)
  - Abgabe der Berstfreisetzung in die Atmosphäre (restlicher Teil in Wasser)
    - Edelgase/Tritium 100 %
    - Halogene Alkalimetalle 10 %
    - sonstige Feststoffe 1 %
- Auslaugung in das Beckenwasser (gemäß [BMI 83] 3.1.1 und 3.1.6)
  - Freisetzungsanteile:
    - Halogene Alkalimetalle 5 %
    - sonstige Feststoffe 0,5 %
- Verdampfung Verspritzung
  - verspritzender Anteil (gemäß [BMI 83] 3.1.8) 1 %
  - Aktivitätskonzentration im Dampf (gemäß [BMI 83] 3.1.8) 5 %
  - der Aktivitätskonzentration im Wasser
  - Wassermenge im Becken 1,190 Mg

Als Zeitdauer für die Emission wird ein Wert  $< 1$  h für die Berstfreisetzung angesetzt. Die Freisetzung über Verdampfung/Verspritzung wird in einem Zeitraum von 1-8 h angenommen. Der Emissionsort wird am Zentrum des Nasslagerbeckens lokalisiert. Dieses befindet sich im Reaktorgebäude (siehe Abbildung 3-2) mit der Höhe der Oberkante von 39 m über GOK. Als anfängliche Quellausdehnung wird die Fläche des Lagerbeckens (ca. 10 m x 11 m) angesetzt.

In Tabelle 5-1 und

Tabelle 5-2 sind die verwendeten Parameter zusammengefasst und die aus obigen Annahmen resultierenden Quellterme dargestellt, wobei sich die Darstellung auf die radiologisch relevanten Nuklide beschränkt.

Tabelle 5-1: Quelltermberechnung für die Berstfreisetzung

Nuklid <sup>a)</sup>	Aktivität [Bq]	Berstfreisetzungsfaktor	Freisetzunganteil in Luft bei Berstfreisetzung	Berstfreisetzung [Bq]
Sr-90	$4,55 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$4,55 \cdot 10^5$
Cs-134	$2,30 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	10 %	$2,30 \cdot 10^7$
Cs-137	$6,29 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	10 %	$6,29 \cdot 10^8$
Pu-238	$1,52 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$1,52 \cdot 10^4$
Pu-239	$3,51 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$3,50 \cdot 10^3$
Pu-240	$4,59 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$4,95 \cdot 10^3$
Pu-241	$4,12 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$4,12 \cdot 10^5$
Am-241	$2,27 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$2,27 \cdot 10^4$
Cm-244	$6,78 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1 %	$6,78 \cdot 10^3$

<sup>a)</sup> zusätzlich zu den hier aufgeführten, im Fall der Berstfreisetzung radiologisch relevanten Nukliden wurden in den Berechnungen alle weiteren in [VAI 14] angegebenen Nuklide berücksichtigt

Tabelle 5-2: Quelltermberechnung für den Flugzeugabsturz ohne Brand (Summe)

Nuklid <sup>a)</sup>	Aktivität [Bq]	Auslaugungs- faktor	Aktivität im Beckenwasser [Bq]	Dampfüber- gangskoeffi- zient	verdampfen- der Anteil	Dampffrei- setzungs- aktivität [Bq]
Sr-90	$4,55 \cdot 10^{11}$	0,5 %	$2,28 \cdot 10^{11}$	5 %	1 %	$1,14 \cdot 10^8$
Cs-134	$2,30 \cdot 10^{12}$	5,0 %	$1,15 \cdot 10^{11}$	5 %	1 %	$5,76 \cdot 10^7$
Cs-137	$6,29 \cdot 10^{13}$	5,0 %	$3,15 \cdot 10^{12}$	5 %	1 %	$1,58 \cdot 10^9$
Pu-238	$1,52 \cdot 10^{12}$	0,5 %	$7,60 \cdot 10^9$	5 %	1 %	$3,80 \cdot 10^6$
Pu-239	$3,51 \cdot 10^{11}$	0,5 %	$1,75 \cdot 10^9$	5 %	1 %	$8,76 \cdot 10^5$
Pu-240	$4,59 \cdot 10^{11}$	0,5 %	$2,48 \cdot 10^9$	5 %	1 %	$1,24 \cdot 10^6$
Pu-241	$4,12 \cdot 10^{13}$	0,5 %	$2,06 \cdot 10^{11}$	5 %	1 %	$1,03 \cdot 10^8$
Am-241	$2,27 \cdot 10^{12}$	0,5 %	$1,13 \cdot 10^{10}$	5 %	1 %	$5,67 \cdot 10^6$
Cm-244	$6,78 \cdot 10^{11}$	0,5 %	$3,39 \cdot 10^9$	5 %	1 %	$1,69 \cdot 10^6$

<sup>a)</sup> zusätzlich zu den hier aufgeführten, im Fall des Flugzeugabsturzes ohne Brand radiologisch relevanten Nukliden wurden in den Berechnungen alle weiteren in [VAT 14] angegebenen Nuklide berücksichtigt

### 5.1.3. Flugzeugabsturz mit Brand

Die Mechanismen bei der Berstfreisetzung und der Auslaugung werden von Abschnitt 5.1.2 übernommen. Abweichend davon muss jedoch angenommen werden, dass es neben der mechanischen Verspritzung (Annahme in Abschnitt 5.1.2 1 % der Wassermenge) zur Verdampfung relevanter Wassermengen kommt.

Hierfür werden Annahmen getroffen, die auch den Fall abdecken, dass die gesamte maximal für das Militärflugzeug anzunehmende Treibstoffmasse (5 Mg) im Bereich des Beckens (Brandfläche ca. 100 m<sup>2</sup>) verbrennen kann.

Der Anteil der Wärme, der zur Aufheizung der Luft (Thermik) beiträgt, wird mit ca. 25 % angenommen. Die verbleibenden ca. 75 % der Verbrennungswärme werden direkt abgestrahlt oder führen zum Verdampfen von Wasser. Die Verbrennung des Flugzeugtreibstoffs erfolgt im Bereich des Beckens an der Wasseroberfläche. Die Strahlungswärme wird daher überwiegen. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.1.1 kann die Art des entstehenden Brandes nicht genau spezifiziert werden. Der Anteil der Verbrennungswärme, der zur Verdampfung führt (im Folgenden mit  $f_{w,ver}$  bezeichnet), ist daher nicht genau zu parametrisieren. Es werden deshalb Werte von 1 %, 2,5 %, 5 %, 10 % und 25 % betrachtet. Die Fälle mit geringerem Anteil der Verbrennungswärme, der zur Verdampfung führt, sind auch abdeckend für den Fall, dass nicht die gesamte maximale Treibstoffmasse im Bereich des Beckens verbrennt.

Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt  $c_{w,ver} = 4,19 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ , die Ausgangstemperatur im Becken wird mit 30° C angenommen. Die spezifische Verdampfungswärme von Wasser beträgt 2.256 kJ/kg bei Normaldruck. Der Heizwert von Kerosin wird mit 43 MJ/kg angenommen. Mit den obigen Parametern kann die Verdampfungsmenge beim Brand von Kerosin mit

$$m_{\text{ver}} = f_{w,ver} \cdot \frac{\text{Heizwert}_{k,ver}}{\text{Verdampfungswärme}_{w,ver} + \Delta T \cdot c_{w,ver}} \cdot m_{k,ver}$$

abgeschätzt werden. Daraus ergeben sich mit der Gesamtwassermenge im Becken von 1.190 Mg die in Tabelle 5-3 berechneten Anteile der verdampfenden Wassermenge.

Tabelle 5-3: Verdampfende Anteile am Beckenwasser für verschiedene Annahmen zu der zur Verfügung stehenden Verdampfungswärme

Anteil Verdampfungswärme	Anteil Verdampfung Wasser
1,0 %	0,07 %
2,5 %	0,18 %
5,0 %	0,35 %
10 %	0,71 %
25 %	1,8 %

Zur Berechnung des jeweiligen Quellterms (Tabelle 5-4) wird unterstellt, dass die in Abschnitt 5.1.2 angenommenen 1 % der Wassermenge, die verspritzt, zu den in Tabelle 5-3 berechneten Anteilen hinzukommen.

In nachfolgender Tabelle sind die verwendeten Parameter zusammengefasst und der aus obigen Annahmen resultierende Quellterm dargestellt. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf die radiologisch relevanten Nuklide<sup>11</sup> Cs-134 und Cs-137.

Tabelle 5-4: Quelltermberechnung für den Flugzeugabsturz mit Brand

Nuklid <sup>a)</sup>	Aktivität im Beckenwasser [Bq]	Dampfübergangskoeffizient	Dampffreisetzungsmenge [Bq] bei Anteil verdampfender Wassermenge				
			1,07 %	1,18 %	1,35 %	1,71 %	2,8 %
Cs-134	$1,15 \cdot 10^{11}$	5 %	$6,18 \cdot 10^7$	$6,79 \cdot 10^7$	$7,81 \cdot 10^7$	$9,86 \cdot 10^7$	$1,60 \cdot 10^8$
Cs-137	$3,15 \cdot 10^{17}$	5 %	$1,69 \cdot 10^9$	$1,85 \cdot 10^9$	$2,13 \cdot 10^9$	$2,69 \cdot 10^9$	$4,36 \cdot 10^9$

zusätzlich zu den hier aufgeführten im Fall des Flugzeugabsturzes mit Brand radiologisch relevanten Nukliden wurden in den Berechnungen alle weiteren in [VAI 14] angegebenen Nuklide berücksichtigt

Im Fall eines Brandes im Reaktorgebäude kommt es zu einer thermischen Überhöhung der Rauchgasstahne. Diese abstandsabhängige Überhöhung, die zur eigentlichen Freisetzungshöhe zu addieren ist, ergibt sich aus dem freigesetzten Wärmestrom und der Windgeschwindigkeit.

Nach [SSK 03] kann diese Überhöhung über den gleichzeitig freigesetzten Wärmestrom M abgeschätzt werden. Für den Kerosinbrand wurde eine Abbrandrate von 4 mm/min im sich ausbildenden Treibstoffpool angenommen. Für eine Energiefreisetzung von 43 MJ/kg, einen Verlust durch Strahlungswärme und durch Aufheizung und Verdampfen des Wassers von insgesamt 75 % ergibt sich

<sup>11</sup> Durch die beim Brand berücksichtigte thermische Überhöhung sind dies in diesem Fall nur die Spaltprodukte Cs-134 und Cs-137.

bei einer Fläche des Brandes (Fläche, über die die Hauptmenge des brennenden Treibstoffs verteilt ist) von etwa 100 m<sup>2</sup> ein virtueller Wärmestrom von 57 MW bei einer Branddauer von 15 Minuten. Bei einer Brandfläche von 25 m<sup>2</sup> ergeben sich ein virtueller Wärmestrom von 14 MW und eine Branddauer von 60 Minuten.

Konservativ wird für die Ausbreitungsberechnung in allen Fällen vom geringeren Wärmestrom ausgegangen. Diese Annahme deckt damit auch die Fälle ab, bei denen ein geringerer Teil des Treibstoffes im direkten Beckenbereich verbrennt.

## 5.2. Ausbreitungsberechnung

In diesem Abschnitt sind für die betrachteten Varianten des Flugzeugabsturzes die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Um eine Einschätzung der Wirkung der einzelnen Freisetzungsphasen Berstfreisetzung und Dampffreisetzung vornehmen zu können, werden diese separat betrachtet. Bei allen Freisetzungsszenarien wird jeweils von den gleichen Gebäude- und Geländedaten ausgegangen.

Für die Szenarien des Flugzeugabsturzes unterscheiden sich die Fälle ohne und mit Brand sowohl im Quellterm als auch in der anzunehmenden Überhöhung. Es werden daher beide Fälle betrachtet. Beim Flugzeugabsturz mit Brand wird zusätzlich zum verspritzenden Anteil von 1 % für das Auslaufen eines kalten Behälters (gemäß [BMI 83] Abschnitt 3.1.8) die durch die Verbrennungswärme verdampfende Wassermenge betrachtet. Es ergeben sich folgende zu betrachtende Szenarien und Freisetzungspfade:

Tabelle 5-5: Aus den Quelltermen und Überhöhungparametern abgeleitete Szenarien

Nr.	Beschreibung	Quellterm	thermische Leistung	Bemerkung
1	Berstfreisetzung ohne Brand	Tabelle 5-1, Spalte Berstfreisetzung	keine	abdeckend für weitere Fälle
2	Verdunstungs-/Verspritzungs-freisetzung ohne Brand	Tabelle 5-2, Spalte Dampffreisetzung	keine	
3 - 7	Verdampfungsfreisetzung mit Brand	Tabelle 5-4, Spalten 4 bis 8	14 MW	

Mit den in Tabelle 5-5 aufgeführten Randbedingungen und den meteorologischen Parametern nach Abschnitt 2.2.1 ergeben sich an den gemäß Abschnitt 2.5.2 gewählten ungünstigsten Aufpunkten die in Tabelle 5-6 zusammengestellten Ausbreitungs- und Ablagerungsparameter.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung für die Freisetzungsszenarien gemäß Tabelle 5-5

Nr.	AK	$\gamma$ -Bodenstrahlung		Inhalation	
		AP <sup>a)</sup>	W <sub>f</sub> <sup>b)</sup> [1/m <sup>2</sup> ] <sup>b)</sup>	AP <sup>a)</sup>	A <sub>f</sub> [s/m <sup>3</sup> ] <sup>c)</sup>
1	D	3 / 1400	5,0 · 10 <sup>-7</sup>	6 / 50	5,1 · 10 <sup>-4</sup>
2	D	3 / 1400	5,0 · 10 <sup>-7</sup>	6 / 50	5,1 · 10 <sup>-4</sup>
3 - 7	C	3 / 1400	2,8 · 10 <sup>-7</sup>	3 / 3200	4,9 · 10 <sup>-7</sup>

<sup>a)</sup> AP: Aufpunkt, Sektor Entfernung [m]

<sup>b)</sup> W<sub>f</sub><sup>b)</sup>: Ablagerungsfaktor für den Boden [1/m<sup>2</sup>]

<sup>c)</sup> A<sub>f</sub>: Ausbreitungsfaktor [s/m<sup>3</sup>]

### 5.3. Dosisberechnungen

Im Folgenden werden Berechnungen in Anlehnung an [SSK 03B] (Erläuterung siehe Abschnitt 2.2.4) für die Szenarien gemäß Tabelle 5-5 durchgeführt. Die Berechnungen berücksichtigen die Wirkung von Inhalation (inklusive Folgedosis) und Direktstrahlung sowie die Einwirkung der Bodenstrahlung über einen Zeitraum von 7 Tagen bzw. 1 Jahr. Ingestion wird bei diesen Berechnungen nicht berücksichtigt. Dies entspricht den Betrachtungen gemäß [SSK 03B] für den Eingreifrichtwert für den Aufenthalt im Gebäude und für Evakuierungsmaßnahmen (7-Tage-Folgedosis) bzw. langfristige Umsiedlung (1-Jahr-Folgedosis). Eine separate Ausweisung der Dosis für die *Schilddrüse* ist nicht notwendig, da keine Freisetzung radiologisch relevanter Aktivitäten von Iodisotopen zu erwarten ist

Angegeben wird die jeweilige berechnete Gesamtdosis über alle betrachteten Pfade sowie die Dosis durch  $\gamma$ -Bodenstrahlung und durch Inhalation. Auf eine separate Angabe der Dosis durch  $\beta$ -Submersion und  $\gamma$ -Submersion wird verzichtet, da diese Pfade in keinem Szenario einen signifikanten Beitrag zur Gesamtdosis leisten.

#### 5.3.1. Berstoffreisetzung

Tabelle 5-7 zeigt die Werte der Effektivdosis für das Szenario „Berstoffreisetzung“. Der dominierende Anteil der für die 7-Tage-Folgedosis wird hier vom Expositionspfad Inhalation verursacht. Für die 1-Jahr-Folgedosis ist der Beitrag des Expositionspfades  $\gamma$ -Bodenstrahlung dagegen (für alle Altersgruppen bis 17 Jahre) größer. Die am höchsten belastete Altersgruppe ist die Altersgruppe der Erwachsenen mit einer effektiven Dosis aus äußerer Bestrahlung und Inhalation von 0,006 mSv für einen Zeitraum von 7 Tagen. Für den Zeitraum von 1 Jahr ergibt sich für alle Altersgruppen eine gleiche Dosis von 0,002 mSv



Tabelle 5-7: Effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an den ungünstigsten Aufpunkten für die Berstfreisetzung

Alter	Betrachtungszeitraum	Effektive Dosis [mSv]		
		$\gamma$ -Bodenstr.	Inhalation	Äuß. Bestrahlung + Inhalation
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	7 Tage	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Kleinkinder (1 – 2 Jahre)		$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Kindergartenkinder (2 – 7 Jahre)		$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Schulkinder (7 – 12 Jahre)		$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
Jugendliche (12 – 17 Jahre)		$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$1,1 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	1 Jahr	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Kleinkinder (1 – 2 Jahre)		$9,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Kindergartenkinder (2 – 7 Jahre)		$7,8 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Schulkinder (7 – 12 Jahre)		$7,3 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Jugendliche (12 – 17 Jahre)		$6,2 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$5,6 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Die potentielle Exposition durch  $\gamma$ -Bodenstrahlung<sup>12</sup> wird fast ausschließlich durch die Nuklide Cs-137 (ca. 90 %) und Cs-134 (ca. 10 %) verursacht. Die potentielle Exposition durch Inhalation<sup>12</sup> wird maßgeblich durch Cs-137 (ca. 75 %) durch  $\alpha$ -aktive Nuklide (Am-241 ca. 7 %, Pu-238 ca. 5 %) verursacht. Sr-90 trägt zu ca. 0,2 % zur potentiellen Exposition durch Inhalation bei.

### 5.3.2. Verdunstungs- und Verspritzungsfreisetzung ohne Brand

Tabelle 5-8 zeigt die Werte der Effektivdosis für das Szenario „Flugzeugabsturz ohne Brand“. Der dominierende Anteil der Dosis wird hier vom Expositionspfad Inhalation verursacht. Durch den geringen Beitrag des Expositionspfades  $\gamma$ -Bodenstrahlung ergeben sich nur geringe Unterschiede für die beiden Betrachtungszeiträume. Die am höchsten belastete Altersgruppe ist die Altersgruppe der Erwachsenen mit einer effektiven Dosis aus äußerer Bestrahlung und Inhalation von 0,32 mSv für einen Zeitraum von 7 Tagen bzw. 0,34 mSv für einen Zeitraum von 1 Jahr.

<sup>12</sup> Anteile der einzelnen Nuklide über die verschiedenen Altersgruppen gemittelt

Tabelle 5-8: Effektive Dosis in mSv für die äußeren Pfade und Inhalation an den ungünstigsten Aufpunkten für die Verdunstungs-/Verspritzungsfreisetzung beim Flugzeugabsturz ohne Brand

Alter	Betrachtungszeitraum	Effektive Dosis [mSv]		
		$\gamma$ -Bodenstr.	Inhalation	Äuß. Bestrahlung + Inhalation
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	7 Tage	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-1}$
Kleinkinder (1 - 2 Jahre)		$5,7 \cdot 10^{-5}$	0,13	0,13
Kindergartenkinder (2 - 7 Jahre)		$5,0 \cdot 10^{-5}$	0,16	0,16
Schulkinder (7 - 12 Jahre)		$4,6 \cdot 10^{-5}$	0,23	0,23
Jugendliche (12 - 17 Jahre)		$4,0 \cdot 10^{-5}$	0,27	0,27
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$3,6 \cdot 10^{-5}$	0,32	0,32
Säuglinge ( $\leq 1$ Jahr)	1 Jahr	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$	0,11
Kleinkinder (1 - 2 Jahre)		$3,1 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,16
Kindergartenkinder (2 - 7 Jahre)		$2,7 \cdot 10^{-2}$	0,16	0,19
Schulkinder (7 - 12 Jahre)		$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,23	0,25
Jugendliche (12 - 17 Jahre)		$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,27	0,29
Erwachsene ( $> 17$ Jahre)		$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,32	0,34

Die potentielle Exposition durch  $\gamma$ -Bodenstrahlung<sup>12</sup> wird fast ausschließlich durch die Nuklide Cs-137 (ca. 90 %) und Cs-134 (ca. 10 %) verursacht. Die potentielle Exposition durch Inhalation wird maßgeblich durch  $\alpha$ -aktive Nuklide (Am-241 ca. 33 %, Pu-238 ca. 25 %) sowie durch die  $\beta$ -aktiven Nuklide Cs-137 (ca. 7 %) und Pu-241 (ca. 10 %) verursacht. Sr-90 trägt zu ca. 1,5 % zur potentiellen Exposition durch Inhalation bei.

### 5.3.3. Verdampfungsfreisetzung mit Brand

In Tabelle 5-9 sind die Dosiswerte für den Flugzeugabsturz mit Brand angegeben. In der Tabelle wird nur die effektive Dosis als Summe der Dosis aus äußerer Bestrahlung und der Inhalationsdosis angegeben. Die Bodenstrahlung ist überwiegend<sup>13</sup> relevant. Die brandbedingte Überhöhung führt zu sehr niedrigen bodennahen Konzentrationen. Dadurch spielt die Inhalationsdosis keine Rolle.

Die höchste Dosis am ungünstigsten Aufpunkt wird in allen Fällen für die Altersgruppe der Säuglinge berechnet. In allen Fällen werden Werte  $< 0,0013$  mSv (7-Tage-Folgedosis) bzw.  $< 0,057$  mSv (1-Jahr-Folgedosis) ermittelt.

<sup>12</sup> Für die 7-Tage-Folgedosis ist der Anteil der Exposition durch Inhalation (insbesondere bei der Altersgruppe der Erwachsenen zwar hoch (40 %), die entsprechenden Gesamtexpositionen sind aber unbedeutend

Tabelle 5-9: Effektive Dosis in mSv als Summe über die äußeren Pfade und die Inhalation an den ungünstigsten Aufpunkten für die Verdampfungsfreisetzung beim Militärflugzeugabsturz mit Brand

Alter	Betrachtungszeitraum	Effektive Dosis [mSv] bei einem Anteil der Verbrennungswärme zur Wasserverdampfung von				
		1 %	2,5 %	5 %	10 %	25 %
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	7 Tage	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$
Kleinkinder (1 – 2 Jahre)		$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Kindergartenkinder (2 – 7 Jahre)		$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Schulkinder (7 – 12 Jahre)		$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Jugendliche (12 – 17 Jahre)		$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Erwachsene (> 17 Jahre)		$4,9 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Säuglinge (≤ 1 Jahr)	1 Jahr	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Kleinkinder (1 – 2 Jahre)		$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Kindergartenkinder (2 – 7 Jahre)		$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Schulkinder (7 – 12 Jahre)		$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
Jugendliche (12 – 17 Jahre)		$9,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Erwachsene (> 17 Jahre)		$8,6 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$

### 5.3.4. Gesamtdosis

In Abschnitt 5.3.1 bis 5.3.3 werden die jeweiligen Dosen für die einzelnen Szenarien ermittelt. Die gesamte Dosis im ungünstigsten Fall ergibt sich, wenn man die Berstfreisetzung sowie den ungünstigsten Fall aus der Verdampfungsfreisetzung addiert. Es wird dabei konservativ angenommen, dass für beide Freisetzungsphasen jeweils verschiedene Weitersituationen vorliegen können und es wird primär davon ausgegangen, dass der Anteil der beim Flugzeugabsturz beschädigten Defektstäbe 100 % beträgt.

Sowohl für die 7-Tage-Folgedosis als auch für die 1-Jahr-Folgedosis führt in allen Fällen die Kombination aus Berstfreisetzung und Verdunstungs-/Verspritzungsfreisetzung beim Flugzeugabsturz ohne Brand zur höchsten potentiellen Exposition.

Für keine der Altersgruppen übersteigt die 7-Tage-Folgedosis sowie die 1-Jahr-Folgedosis 0,4 mSv, wobei hiervon der größte Teil der potentiellen Dosis durch den Expositionspfad Inhalation verursacht wird und damit unabhängig vom Betrachtungszeitraum ist.

Die berechneten potentiellen Expositionen liegen alle deutlich unterhalb der in Tabelle 2-4 aufgeführten Eingreifrichtwerte (10 mSv bzw. 100 mSv).

## 6. QUELLEN

- [BMI 83] BUNDESMINISTERIUM DES INNEREN  
Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien des BMI zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV  
Bekanntmachung von Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission vom 18. Oktober 1983, BAnz Nr. 245a, 31.12.1983
- [BMU 00] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT  
Begründung (zur Neufassung der StrlSchV), Stand: 04.08.2000
- [BMU 01] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT  
Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001  
Bundesanzeiger, Nr. 160 a/b vom 28. August 2001
- [BOE 06] BOETSCH, W. U.; GRÜNDLER, D.; THIEL, J.  
Identification of release rates as a consequence of thermal impact on RADWASTE – Experimental Studies; WM'06 Conference, February 2006, Tucson, AZ
- [BS 06] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH  
Abschätzung der radiologischen Folgen eines Flugzeugabsturzes auf das Brennelementlager – Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage  
BS-Projekt-Nr. 0608-12, 01.12.2006
- [BS 12] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH  
Abschätzung der radiologischen Folgen eines Flugzeugabsturzes auf das Brennelementlagerbecken – Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage – Aktualisierung für die Nachbetriebsphase  
BS-Projekt-Nr. 1112-01, Aachen, 26.06.2012
- [BS 15] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH  
Kernkraftwerk Brunsbüttel – Berechnung der ereignisbedingten Strahlenexposition sowie der Direktstrahlung infolge der auf dem Gelände des KKB vorgesehenen Pufferlagerung während des Abbaus der Anlage  
BS-Projekt-Nr. 1401-01  
Aachen, 22.12.2015
- [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
- [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
- [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
- [NRC 98] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION  
Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook  
NUREG / CR - 6410, 1998
- [SSK 03] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION  
Störfällberechnungsgrundlagen (SBC) zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Be-  
rechnung der Strahlenexposition, Empfehlung der SSK verabschiedet in der 186. Sitzung am  
11.09.2003
- [SSK 03B] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION  
Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechni-  
schen Notfällen, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 37 (Vorabdruck),  
2003
- [SSV 11] STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (STRLSCHV) IN DER FASSUNG VOM 20. JULI 2001  
Verordnung über den Schutz vor Schaden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutz-  
verordnung - StrlSchV)  
vom 20. Juli 2011 (BGBl. I S. 1714, ber. BGBl. 2002 I S. 1459.)  
zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010)



- [TÜV 09] TÜV NORD SYSTEC GMBH & CO. KG  
Qualitative Schwachstellenanalyse für die Reaktoranlage Brunsbüttel bei grundsätzlicher  
Unterstellung eines Flugzeugabsturzes  
Hier: Offener Punkt OP-1-1, Radiologische Folgen eines Flugzeugabsturzes auf das Brenn-  
elementlager  
Zwischenbericht KKB2007/4535 (VS - nur für den Dienstgebrauch)  
10.02.2009
- [VAT 12] VAITENFALL EUROPE NUCLEAR ENERGY GMBH  
Broschüre „Kernkraftwerk Brunsbüttel – Sicher und leistungsstark“  
2012
- [VAT 14] VAITENFALL EUROPE NUCLEAR ENERGY GMBH  
Calculation of the activity of 13 defect fuel rods at KKB  
Document-ID: CN-TV-RP001-14R0  
including 13 output files of SSP Spent Nuclear Fuel code SNF version 1.6  
Draft, 10.01.2014
- [VDI 85] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE  
Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre  
Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung  
VDI 3782 Blatt 3  
Juni 1985