

**Untersuchungen  
zur Sicherheit bei  
der Beförderung  
radioaktiver Stoffe**

Teil 1.2  
Berechnung von  
Aktivitätsgrenzwerten –  
Freigrenzen

## **Untersuchungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe**

Teil 1.2  
Berechnung von  
Aktivitätsgrenzwerten –  
Freigrenzen

Abschlussbericht zum  
Arbeitspaket 4

Cornelia Richter  
Patrick Eich

September 2014

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben 3611R03300 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

**Deskriptoren**

Freigrenzen, Radiation Protection 65, RP 65, BerFG

## **Kurzfassung**

Ein Ziel des Vorhabens 3611R03300 war die Analyse der Berechnungsmethodik und die entsprechende Entwicklung eines Programms zur Berechnung von Freigrenzen nach den EU Berechnungsvorschriften Radiation Protection 65 (RP 65). Zur Umsetzung dieser Aufgabe wurde ein Rechenprogramm in Microsoft Excel entwickelt, die notwendigen Rechenfunktionen sind in Excel-VBA-Code geschrieben. Die Programmentwicklung und die zugrundeliegenden Rechenmodelle sind in diesem Bericht dokumentiert. Ein Vergleich der Ergebnisse des Rechenprogrammes mit denen aus RP 65 zeigt eine gute Übereinstimmung fast aller dort zusammengestellten Freigrenzen.

Im Rahmen der Entwicklung traten viele Dokumentationsschwächen und Problempunkte der RP 65 zutage, die eine ursprünglich geplante Erweiterung des Programms zur Berechnung neuer Freigrenzen verhinderte. Insbesondere die Berechnungsmethodik für die benötigten nuklidabhängigen Parameter konnten teilweise nicht mehr reproduziert werden.

## **Abstract**

One aim of this project 3611R03300 was the analysis of the methods for the calculation of exemption values and the development of software for the calculation following the EU Principles and Methods of Radiation Protection 65 (RP 65). A program was developed using Microsoft Excel-VBA. In this document, the development and underlying model is described. A comparison of the newly calculated values with the tabulated values of RP 65 shows a very good agreement.

During the development a lot of deficiencies of the RP 65 documentation became evident, precluding the expansion of the program for the calculation of new exemption values. Especially the methods for the calculation of nuclide specific parameters could not be reproduced partly.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modell zur Berechnung von Freigrenzen nach RP 65.....</b>	<b>3</b>
2.1	Berücksichtigung von Zerfallsreihen / Tochternukliden .....	6
2.2	Verwendete Rundungsmethode.....	7
2.3	Aktivitätskonzentrationen.....	10
2.3.1	<i>Normal Use (Workplace)</i> Szenarien.....	10
2.3.2	<i>Accidental Workplace</i> Szenarien .....	14
2.3.3	<i>Disposal (public)</i> Szenarien .....	15
2.4	Aktivitäten.....	18
2.4.1	<i>Normal Use (Workplace)</i> Szenarien.....	18
2.4.2	<i>Accidental Workplace</i> Szenarien .....	21
2.4.3	<i>Disposal (public)</i> Szenario .....	31
<b>3</b>	<b>Programmentwicklung zur Berechnung der Freigrenzen.....</b>	<b>37</b>
3.1	Erkenntnisse aus den Verifikationsrechnungen .....	40
3.1.1	Berücksichtigung der physikalischen Form .....	40
3.1.2	Sonderfall Rn-222+.....	40
3.1.3	Pfad A1.4.....	41
3.1.4	Pfad A1.5.....	41
3.1.5	Pfad B1.2 Externe Exposition durch Handhabung einer Quelle .....	41
3.1.6	Pfad B1.2, Ar-37 .....	42
3.1.7	Pfad B1.2, Ce-139 .....	42
3.1.8	Pfad B3.2 Inhalation von Staub auf einer Deponie.....	42
3.2	Aktualisierung der R-Werte.....	43
3.2.1	R1: Mittlere Energie je Gamma-Zerfall R2: Mittlere Energie je Beta-Zerfall Halbwertszeit zur Ableitung von DECAY .....	44
3.2.2	R5 & R6: Gamma & Beta Dosis infinite Ebene.....	46
3.2.3	R7: Gamma-Hautdosis in 70µm Hauttiefe.....	47
3.2.4	R8: Beta Hautdosis in 40µm Hauttiefe R24: Beta Hautdosis in 400µm Hauttiefe .....	47

3.2.5	R9: Ingestionsdosis pro Einheits-Aufnahme R10: Inhalationsdosis pro Einheits-Aufnahme .....	49
3.2.6	R19: Dosis durch eine Gamma-Punktquelle R20: Dosis durch eine Beta-Punktquelle .....	49
3.2.7	Volatilität S35 von Flüssigkeiten .....	50
<b>4</b>	<b>Programmbeschreibung BerFG.....</b>	<b>51</b>
4.1	Installation .....	51
4.2	Programmstart.....	51
4.3	Durchführen einer Rechnung.....	52
4.3.1	Auswahl des / der Nuklidnamen.....	53
4.3.2	Standard Datenbasis .....	53
4.3.3	Alternative Datenbasis.....	54
4.4	Rechenergebnisse.....	56
4.4.1	Kurzübersicht im Tabellenblatt „ERGEBNISSE“ .....	56
4.4.2	Ausführliche Dokumentation der Berechnung in LOG-Datei .....	57
4.5	Beenden des Programms .....	58
<b>5</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>59</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>61</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>65</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>67</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>69</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>71</b>
A	Freigrenzen für die Aktivitätskonzentration .....	71
B	Aktivitätskonzentrationen .....	87

# 1 Einleitung

Gemäß dem abgestuften Sicherheitskonzept der Transportvorschriften werden die Aktivitätsgrenzwerte für Versandstücke so festgelegt, dass die radiologischen Folgen sowohl beim normalen (unfallfreien) Transport als auch bei Unfällen begrenzt sind. Hierzu wurde von der IEAO das sogenannte Q-System /IAEA 08/ eingeführt, das auf Basis von festgelegten radiologischen Kriterien die zu ihrer Einhaltung maximal zulässigen Aktivitätswerte (sogenannte A-Werte) bestimmt.

Weiterhin wurden von der IEAO Grenzwerte der Aktivitätskonzentration bzw. der Aktivität für freigestellte Stoffe („exempt material“) sowie für freigestellte Sendungen („exempt consignment“) eingeführt, unterhalb derer die Transportvorschriften nicht anzuwenden sind. Diese Werte basieren auf den in den Basic Safety Standards (BSS) der IEAO /IAEA 96/ veröffentlichten Freigrenzen („exemption values“), die auf Basis einer von der EU-Kommission in Auftrag gegebenen Berechnungsmethode /EC 93/ (im Folgenden mit RP 65 bezeichnet) ermittelt wurden. Der Grundgedanke der dabei angewendeten Methodik ist, dass bei Unterschreitung dieser Freigrenzen aufgrund des geringen radiologischen Gefährdungspotenzials keine Überwachung des Stoffes (oder der Sendung) notwendig ist. Diese Stoffe fallen somit nicht in den Anwendungsbereich der IEAO-Transportvorschriften und unterliegen demzufolge auch nicht dem Geltungsbereich der gefahrgutrechtlichen Vorschriften.

Das Ziel des AP 4 war es, in Anlehnung an die Berechnungsmethodik der IEAO, die entsprechenden Modellansätze für Standardszenarien mit der Möglichkeit optional flexiblerer Randbedingungen zu einem Modellsystem zur Ableitung sowohl der Freigrenzen als auch der Aktivitätsgrenzwerte weiterzuentwickeln und anzuwenden.

Der vorliegende Bericht stellt das Modell zur Berechnung der Freigrenzen nach RP 65 vor. Dazu wird zunächst die Methodik des Ausgangsdokumentes wiedergegeben (Kapitel 2), anschließend die Schritte der Softwareentwicklung dargestellt (Kapitel 3). Bei vorhandenen Dokumentationslücken im Ausgangsdokument mussten hierbei sinnvolle Umsetzungen im Programmcode gefunden werden, die anhand von Verifikationsrechnungen überprüft und in diesem Bericht dokumentiert wurden. In Kapitel 4 folgt die Programmbeschreibung (Bedienungsanleitung) für das Programm BerFG. Der Bericht schließt mit Diskussion und Ausblick in Kapitel 5.





## 2 Modell zur Berechnung von Freigrenzen nach RP 65

Die Berechnung der Freigrenzen erfolgt anhand sogenannter Szenarien für die Exposition von Personen. Dabei beschränken sich die herangezogenen Szenarien und Expositionspfade nicht nur auf Situationen, die beim Transport radioaktiver Stoffe auftreten können, sondern stellen auch sicher, dass beim Unterschreiten der „exemption values“ sowohl bei der beabsichtigten als auch bei der unbeabsichtigten Handhabung radioaktiver Stoffe ein radiologisches Gefährdungspotenzial für Arbeiter und Einzelpersonen der Bevölkerung ausgeschlossen werden kann.

Die Szenarien werden in drei Kategorien unterteilt:

1. Bei den sogenannten *Normal Use-Szenarien (Workplace)* werden Expositionen betrachtet, die durch routinemäßige Handhabung von Quellen oder auch durch die unabsichtliche Aufnahme von radioaktiven Stoffen verursacht werden.
2. Die *Accidental (Workplace) Szenarien* beinhalten unvorhergesehene Ereignisse und Vorkommnisse, bei denen es durch externe Exposition, Inhalation oder Ingestion zur Exposition kommt.
3. Bei den *Disposal (Public) Szenarien* wird die Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung betrachtet, die nicht im Rahmen von Arbeitsprozessen eingebunden sind und die beispielsweise in Folge der Verbringung und anschließenden Verteilung von Quellmaterial auf einer Deponie exponiert werden. Es werden sowohl *Normal Use* als auch *Accidental Situations* betrachtet und dabei externe Exposition, Inhalation und Ingestion berücksichtigt.

Weiterhin wird zwischen der Aktivitätskonzentration (Abkürzung A in Tab. 2.1) und der Aktivität (Abkürzung B in Tab. 2.1) für die einzelnen Szenarien unterschieden. Mit den Szenarien werden für Einheits-Aktivitätskonzentrationen (1 Bq/g) bzw. Einheits-Aktivitäten (1 Bq) effektive Dosen sowie äquivalent Hautdosen berechnet. Wie weiter unten beschrieben, lassen sich die berechneten Dosen mittels der Dosiskriterien aus Tab. 2.2 in Freigrenzen umrechnen.

**Tab. 2.1** Betrachtete Szenarien im Modell zur Berechnung der Freigrenzen nach RP 65

<b>Aktivitätskonzentration (A)</b>	
<b>A 1</b>	Normal use (workplace) Szenario
A 1.1	Externe Exposition durch Handhabung einer Quelle
A 1.2	Externe Exposition durch eine 1 m <sup>3</sup> große Quelle
A 1.3	Externe Exposition durch eine Gasflasche
A 1.4	Inhalation von Staub und Aerosolen
A 1.5	Ingestion durch kontaminierte Hände
<b>A 2</b>	Accidental (workplace) Szenario
<b>A 3</b>	Disposal (public) Szenario
A 3.1	Externe Exposition von einer Deponie
A 3.2	Inhalation von Staub von einer Deponie
A 3.3	Ingestion eines Objektes von einer Deponie
<b>Aktivitäten (B)</b>	
<b>B 1</b>	Normal use (workplace) Szenario
B 1.1	Externe Exposition von einer Punktquelle
B 1.2	Externe Exposition durch Handhabung einer Quelle
<b>B 2</b>	Accidental (workplace) Szenario
B 2.1	Verschüttung: Externe Exposition durch kontaminierte Hände
B 2.2	Verschüttung: Externe Exposition durch kontaminiertes Gesicht
B 2.3	Verschüttung: Externe Exposition durch kontaminierte Oberfläche
B 2.4	Verschüttung: Ingestion von den Händen
B 2.5	Verschüttung: Inhalation von resuspendierender Aktivität
B 2.6	Verschüttung: Externe Exposition durch Aerosol- oder Staubwolke
B 2.7	Brand: Kontamination der Haut
B 2.8	Brand: Inhalation von Staub oder flüchtigen Stoffen
B 2.9	Brand: Externe Exposition durch Abbrandprodukte
<b>B 3</b>	Disposal (public) Szenario
B 3.1	Externe Exposition durch Deponie
B 3.2	Inhalation durch eine Deponie
B 3.3	Externe Exposition der Haut durch Handhabung eines Objektes von einer Deponie
B 3.4	Ingestion eines Objektes von einer Deponie

**Tab. 2.2** Radiologische Kriterien für die Bestimmung der Aktivität bzw. der Aktivitätskonzentration der Freigrenzen

Dosiskriterium für ein Jahr [mSv]	Effektive Dosis	Hautdosis
Normal situations	0,01	50
Accident situations	1	50

Die Berechnung der Dosen erfolgt anhand der in Tab. 2.1 aufgeführten und in den Unterkapitel 2.3 und 2.4 genauer erläuterten Szenarien für einzelne Nuklide. Dabei gehen die in Tab. 2.3 aufgeführten radionuklidabhängigen Daten (RXX) in die Berechnungen ein. Diese nuklidabhängigen Daten bilden somit den Ausgangspunkt für die Berechnungen. In RP 65 ist in Anhang B Tabelle B1 mit den verwendeten nuklidabhängigen Parametern gegeben. Die Parameter wurden aus verschiedenen Datenbanken bzw. Veröffentlichungen entnommen. Die in RP 65 angegebenen Referenzen für die R-Werte sind ebenfalls in Tab. 2.3 angegeben. Zusätzlich spielt in den Szenarien teilweise auch die physikalische Erscheinungsform des Nuklides (bspw. gasförmig, als Pulver oder als massiver Feststoff) eine Rolle. Die verwendeten physikalischen Erscheinungsformen (*gas/vapor*: gasförmig, *liquid/solution*: flüssig, *dispersible solid*: pulverförmig, *non-dispersible solid*: fest, *thin film/foil*: folienförmig, *sealed source/capsule*: kapselförmig) für jedes Nuklid sind ebenfalls in RP 65, Tabelle B1 vorgegeben. Eine Referenz wird dafür nicht angegeben. Im Text wird erwähnt, dass diesbezüglich eine Expertenbefragung<sup>1</sup> durchgeführt wurde.

Prinzipiell erfolgt die Berechnung der Dosis für jedes Szenario und Nuklid einem einfachen multiplikativen Ansatz:

$$D = (A \text{ oder } C) \cdot f \cdot T \cdot R \cdot U \cdot s \quad (2.1)$$

Dabei steht  $D$  für die Äquivalent-Hautdosis bzw. die Effektivdosis,  $A$  für eine Aktivität von 1 Bq,  $C$  für eine Aktivitätskonzentration von 1 Bq/g,  $f$  für den Bruchteil von  $A$  bzw.  $C$ , der zur Dosis beiträgt,  $T$  für die Expositionszeit [h/a],  $R$  ist der radionuklidabhängige

---

<sup>1</sup> RP 65: „About 300 radionuclides were considered in this study. Their possible uses and their related physical forms were reviewed in consultation with European experts involved in advising small-scale users of radioactivity materials.”

Parameter,  $U$  ist ein Konversionsfaktor abhängig von der physikalischen Form der Quelle und  $s$  steht für die Wahrscheinlichkeit einer Exposition [1/a].

In den Szenarien wird sowohl die Aktivität als auch die Aktivitätskonzentration herangezogen, da beispielsweise bei kleineren Quellen, die Verteilung der Aktivität keine Rolle spielt, wohingegen bei Kontaminationen – etwa des Arbeitsplatzes – die Aktivitätskonzentration betrachtet werden sollte.

Für die *Normal Use (workplace)* und *Disposal (Public)* Szenarien ergibt sich die Dosis für ein Szenario aus der Summe der Dosen von allen Pfaden, die zur Exposition beitragen. Bei den *Accidental (Workplace)* Szenarien werden laut RP 65 die Szenarien, bei denen es in der Folge eines Brandes bzw. aufgrund von Verschütten/Verteilen einer Quelle zur Exposition kommt, getrennt betrachtet. In /HPA 11/, Anhang E wird allerdings klargestellt, dass die in RP 65 veröffentlichten Freigrenzen belegen, dass keine Unterscheidung zwischen den Szenarien Brand und Verschütten/Verteilen vorgenommen wurde und Unterschiede zwischen beiden Herangehensweisen ohnehin sehr gering seien, da bei Brand-Szenarien generell eine bedeutend größere Dosis zu erwarten sei. Abb. 2.1 veranschaulicht die Berechnungsmethodik für die verschiedenen Szenarien und Expositionspfade.

Die Berechnung der Freigrenzen für jedes einzelne Szenario und jedes Nuklid erfolgt anhand der folgenden Formel für die Aktivität

$$\text{Freigrenze der Aktivität [Bq]} = \frac{\text{Dosiskriterium (Tab. 2.2) [Sv y}^{-1}\text{]}}{\text{Dosis je Aktivität [Sv y}^{-1}\text{ / Bq]}} \quad (2.2)$$

und anhand von Formel ((2.3) für die Aktivitätskonzentration

$$\text{Freigrenze der Aktivitätskonz. [Bq g}^{-1}\text{]} = \frac{\text{Dosiskriterium (Tab. 2.2) [Sv y}^{-1}\text{]}}{\text{Dosis je Aktivitätskonz. [Sv y}^{-1}\text{ / Bq g}^{-1}\text{]}} \quad (2.3)$$

## 2.1 Berücksichtigung von Zerfallsreihen / Tochternukliden

Bei einer Reihe von Nukliden entstehen beim Zerfall kurzlebige Zerfallsprodukte („Töchter“), die ihrerseits ebenfalls eine Exposition hervorrufen und daher bei der Berechnung der Effektivdosen bzw. äquivalenten Hautdosen berücksichtigt werden müssen. Bei der Berechnung nach RP 65 wird dabei ein säkulares Gleichgewicht zwischen der Aktivität der „Mütter“ und der „Töchter“ angenommen und die R-Werte für die ge-

samte betrachtete Zerfallsreihe anstatt eines R-Wertes für die Mutter verwendet. Der Name der Mutter wird dann durch ein „+“ oder „N“ (bei den gesondert betrachteten natürlichen Zerfallsreihen von Th-232 und U-238) gekennzeichnet. Eine Übersicht über die in RP 65 berücksichtigten Zerfallsreihen zeigt Tab. 2.4.

**Tab. 2.3** Nuklidabhängige Dosisparameter zur Berechnung der Aktivität und der Aktivitätskonzentration nach RP 65 sowie die dort verwendeten Referenzen

Parameter	Kurzbeschreibung	Referenzen
R <sub>1</sub>	Mittlere Energie je Gamma-Zerfall [MeV]	/ICRP 83/
R <sub>2</sub>	Mittlere Energie je Beta-Zerfall [MeV]	/ICRP 83/
R <sub>5</sub> & R <sub>6</sub>	Gamma & Beta Dosis infinite Ebene [Sv/h pro Bq/m <sup>2</sup> ]	/KOC 83/
R <sub>7</sub>	Gamma-Hautdosis [7mg/cm <sup>2</sup> Sv/h pro Bq/cm <sup>2</sup> ]	/CHP 88/
R <sub>8</sub>	Beta-Hautdosis [4mg/cm <sup>2</sup> Sv/h pro Bq/cm <sup>2</sup> ]	/KOC 87/
R <sub>24</sub>	Beta-Hautdosis [40mg/cm <sup>2</sup> Sv/h pro Bq/cm <sup>2</sup> ]	/KOC 87/
R <sub>9</sub>	Ingestion [Sv/Bq]	/PHI 91/ /ICRP 82/
R <sub>10</sub>	Inhalation [Sv/Bq]	/PHI 91/ /ICRP 82/
R <sub>19</sub>	Punktquelle Gamma [Sv/h pro Bq]	/ASS 91/
R <sub>20</sub>	Punktquelle Beta [Sv/h pro Bq]	/ASS 91/
V	Volatilität von Flüssigkeiten [Anteil am Inventar]	/KLE 90/

## 2.2 Verwendete Rundungsmethode

Bei der Berechnung der Freigrenzen wird folgendes Rundungsverfahren eingesetzt: Liegt der berechnete Wert zwischen  $3 \cdot 10^x$  und  $3 \cdot 10^{x+1}$ , wird der Wert für die Freigrenze auf  $10^{x+1}$  gerundet. Ein Wert von  $6 \cdot 10^7$  ergibt gerundet  $10^8$ , wohingegen ein Wert von  $2 \cdot 10^5$  auf  $10^5$  gerundet wird.

---

<sup>2</sup> Flächenmasse der Haut; 7 mg/cm<sup>2</sup> entsprechen bei einer unterstellten Dichte der Haut von 1 g/cm<sup>3</sup> einer Tiefe von 70 µm.

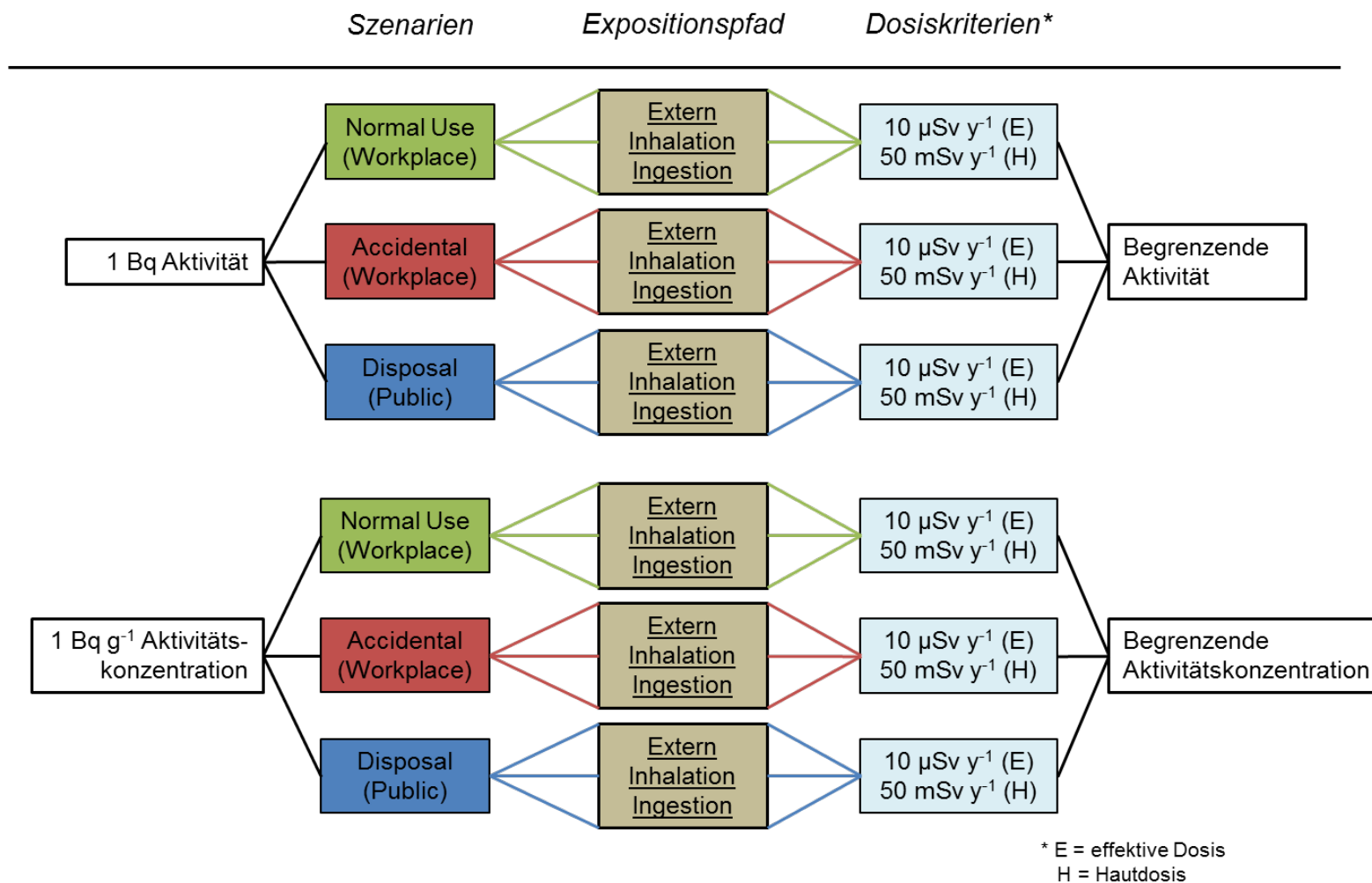


Abb. 2.1

Schematische Darstellung der Berechnungsmethodik für die Aktivitäten und Aktivitätskonzentrationen der Freigrenzen nach /EC 93/

**Tab. 2.4** In RP 65 berücksichtigte Zerfallsreihen

<b>Mutter</b>	<b>Berücksichtigte Töchter in RP 65</b>
Sr-80+	Rb-80
Sr-90+	Y-90
Zr-93+	Nb-93m
Zr-97+	Nb-97
Ru-106+	Rh-106
Ag-108m+	Ag-108
Cs-137+	Ba-137m
Ce-134+	La-134
Ce-144+	Pr-144
Ba-140+	La-140
Bi-212+	Tl-208 (.36), Po-212 (.64)
Pb-210+	Bi-210, Po-210
Pb-212+	Bi-212, Tl-208 (.36), Po-212 (.64)
Rn-220+	Po-216
Rn-222+	Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214
Ra-223+	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207
Ra-224+	Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (.36), Po-212 (.64)
Ra-226+	Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
Ra-228+	Ac-228
Th-226+	Ra-222, Rn-218, Po-214
Th-228+	Ra-224, Rn-220, Po-215, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (.35), Po-212 (.64)
Th-229+	Ra-225, Ac-225, Fr-221, Al-217, Bi-213, Po-213, Pb-209
Th-232N	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-215, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (.36), Po-212 (.64)
Th-234+	Pa-234m
U-230+	Th-226, Ra-222, Rn-218, Po-214
U-232+	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (.36), Po-212 (.64)
U-235+	Th-231
U-238+	Th-234, Pa-234m
U-238N	Th-234, Pa-234m, U-234, Th-230, Ra-225, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
U-240+	Np-240m
Np-237+	Pa-233
Am-242m+	Am-242
Am-243+	Np-239



## 2.3 Aktivitätskonzentrationen

In den folgenden Unterkapiteln werden die in RP 65 verwendeten Szenarien mit ihren Eingangsparametern für die Berechnung der Effektivdosis sowie der äquivalenten Hautdosis vorgestellt.

### 2.3.1 Normal Use (Workplace) Szenarien

Die Normal Use Szenarien stellen Situationen dar, in denen ein Arbeiter bei seiner normalen Arbeit exponiert wird. Das betrachtete Radionuklid wird hier also in der für es vorgesehenen / geplanten Art und Weise verwendet oder gelagert.

#### 2.3.1.1 Szenario A1.1: Externe Exposition durch Handhabung einer Quelle

Im Szenario A1.1 wird davon ausgegangen, dass die Quelle von einer Person für eine begrenzte Zeit gehandhabt wird. Derartige Situationen können beispielsweise bei der Handhabung kleiner Quellen, beim Verpacken radioaktiver Stoffe oder beim Herstellungsprozess kleinerer Komponenten aus radioaktiven Stoffen auftreten.

Bei der Handhabung der Quelle wird unterstellt, dass die Quelle von den Fingern gehalten bzw. von der Handinnenfläche umschlossen wird. Durch die unterstellte Expositionszeit und die geometrische Anordnung ist dieses Szenario abdeckend im Hinblick auf das *Accidental Disposal (Public)* Szenario, in welchem unterstellt wird, dass eine Einzelperson der Bevölkerung auf einer Deponie eine Quelle handhabt.

Der Wert  $H_{\text{Skin}}$  wird berechnet durch:

$$H_{\text{Skin}} = A_S \cdot T \cdot (R_7 + R_{24}) \quad (2.4)$$

mit

$H_{\text{Skin}}$	Hautäquivalentdosis (in $\text{Sv a}^{-1}$ )
$A_S$	Aktivität je Flächeneinheit ( $1 \text{ Bq cm}^{-2}$ )
$T$	Expositionszeit ( $25 \text{ h a}^{-1}$ ).
$R_7$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis, for gamma irradiation ( $7 \text{ mg cm}^{-2}$ ) in ( $\text{Sv h}^{-1}$ je $\text{Bq cm}^{-2}$ )
$R_{24}$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis, for beta irradiation ( $40 \text{ mg cm}^{-2}$ ) in ( $\text{Sv h}^{-1}$ je $\text{Bq cm}^{-2}$ )

Die Effektivdosis der Haut  $E_{\text{Skin}}$  wird berechnet durch:

$$E_{\text{Skin}} = H_{\text{Skin}} \cdot w_{\text{Skin}} \cdot \frac{M/U}{\text{BODY}} = H_{\text{Skin}} \cdot w_{\text{Skin}} \cdot \frac{\text{CONTACT}}{\text{BODY}} \quad (2.5)$$

mit

$H_{\text{Skin}}$	Hautäquivalentdosis (in Sv/a)
$w_{\text{Skin}}$	Hautgewichtungsfaktor (0,01)
$M$	Masse der Quelle (g)
$U$	Massenbelegung der Quelle (s.u.) ( $\text{g cm}^{-2}$ )
$\text{BODY}$	Hautoberfläche Körper ( $10.000 \text{ cm}^2$ )

Für gasförmige Quellen deren Halbwertszeit größer als 24 h ist gilt:

$M = 0,000615$	Masse der Quelle in (g)
$U = 0,00123$	Massenbelegung ( $\text{g cm}^{-2}$ )

Für Feststoffe gilt:

$M = 30$	Masse der Quelle in (g)
$U = 0,168$	Massenbelegung ( $\text{g cm}^{-2}$ )

Für U gilt:

$$U = \rho \cdot t/2 \quad (2.6)$$

wobei  $\rho$  die Dichte der Quelle in  $\text{g cm}^{-3}$  und  $t/2$  die halbe Dicke der Quelle ist.

### 2.3.1.2 Szenario A1.2: Externe Exposition durch eine $1\text{m}^3$ große Quelle

Bei der Berechnung der effektiven Dosis durch eine  $1 \text{ m}^3$  große Quelle, wird unterstellt, dass eine Person für 100 Stunden pro Jahr exponiert wird. Ein Beispiel für dieses Szenario ist die Stapelung von Behältern mit Erzen, die natürliche Radionuklide enthalten, oder die Aufbewahrung von mehreren Quellen in einem Schrank.

Die effektive Dosis einer 1 m<sup>3</sup> großen Quelle  $E$  wird berechnet durch

$$E = C \cdot T \cdot ((GAM \cdot R_1 \cdot GEOM) + (BETA \cdot SHIELD)) \quad (2.7)$$

mit

$C$	Aktivitätskonzentration (1 Bq g <sup>-1</sup> ),
$T$	Expositionszeit (100 h a <sup>-1</sup> ),
$GAM$	effektive Dosisrate 1 m oberhalb einer infinit dicken Platte mit 1 Bq g <sup>-1</sup> pro MeV Gamma Energie (3 · 10 <sup>-7</sup> Sv h <sup>-1</sup> je (Bq g <sup>-1</sup> MeV)),
$GEOM$	Geometrischer Faktor zur Umrechnung von einer infiniten Platte auf eine endliche Quellgröße (0,02)
$BETA$	effektive Dosisrate 1 m oberhalb einer semi-infinit dicken Platte mit 1 Bq g <sup>-1</sup> für Beta-Strahlung (energieabhängig in Sv h <sup>-1</sup> je Bq g <sup>-1</sup> ),
$SHIELD$	Abschirmfaktor für Beta-Strahlung (0,1),
$R_1$	mittlere Photonenenergie pro Zerfall (MeV).

Für den energieabhängigen Faktor  $BETA$  in Gleichung (2.8) gilt nach /ASS 91/ bei:

Energien < 0,1 MeV	$BETA = 0$
Energien ≥ 0,1 MeV < 0,4 MeV	$\ln BETA = 6 \cdot \ln R_2 - 16,4$
Energien ≥ 0,4 MeV	$\ln BETA = 2,86 \cdot \ln R_2 - 19,7$

wobei  $R_2$  für die mittlere Beta-Energie pro Zerfall in MeV steht.

### 2.3.1.3 Szenario A1.3: Externe Exposition durch eine Gasflasche

In diesem Szenario wird unterstellt, dass die arbeitende Person sich in einem Abstand von 1 m in der Nähe einer einzelnen Gasflasche für 100 h pro Jahr aufhält. Derartige Situationen treten beispielsweise in Krankenhäusern oder Laboren auf. Der Beitrag der Beta-Strahlung ist in diesem Szenario vernachlässigbar, da die Beta-Strahlung durch die Wandung der Gasflasche vollständig abgeschirmt wird. Für Gamma-Strahlung wird allerdings keinerlei abschirmende Wirkung von der Flaschenwandung unterstellt.

Die effektive Dosis  $E$  einer  $0,1 \text{ m}^3$  fassenden Gasflasche wird berechnet durch:

$$E = C \cdot T \cdot (GAM R_1) \cdot GEOM \quad (2.9)$$

mit

$C$	Aktivitätskonzentration ( $1 \text{ Bq g}^{-1}$ ),
$T$	Expositionszeit ( $100 \text{ h a}^{-1}$ (Edelgas)),
$GAM$	effektive Dosisrate $1 \text{ m}$ oberhalb einer infinit dicken Platte mit $1 \text{ Bq g}^{-1}$ pro MeV Gamma Energie ( $3 \cdot 10^{-7} \text{ Sv h}^{-1} \text{ je } (\text{Bq g}^{-1} \text{ MeV})$ ),
$GEOM$	Geometrischer Reduktionsfaktor zur Umrechnung von einer infinit dicken Platte zu einer $0,1 \text{ m}^3$ Feststoffquelle ( $3 \cdot 10^{-3}$ ),
$R_1$	mittlere Photonenenergie pro Zerfall (MeV).

#### 2.3.1.4 Szenario A1.4: Inhalation von Staub

Für den Arbeiter wird eine Expositionszeit von 2000 Stunden im Laufe eines Arbeitsjahres unterstellt, bei der er einer Atmosphäre mit einer Staubkonzentration von  $0,04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  ausgesetzt ist<sup>3</sup>. Dabei wird eine adäquate Funktionsweise und Steuerung der Ventilation unterstellt. Beispiele für ein derartiges Expositionsszenario sind Verarbeitungsprozesse von Erzen, in denen natürliche Radionuklide enthalten sind oder auch Verarbeitungsprozesse von kontaminierten metallischen Bauteilen, bei denen durch Fräsen oder Zersägen Stäube entstehen.

Die effektive Dosis durch Inhalation von Staub und luftgetragenen Stoffen  $E$  wird berechnet durch:

$$E = C \cdot T \cdot INH \cdot R_{10} \cdot Dust \quad (2.10)$$

mit

$C$	Aktivitätskonzentration ( $1 \text{ Bq/g}$ ),
$T$	Expositionszeit ( $2000 \text{ h/a}$ ),
$INH$	Atemrate ( $1 \text{ m}^3/\text{h}$ )
$Dust$	luftgetragene Staubkonzentration ( $\text{g/m}^3$ ),
$R_{10}$	Effektive Dosis per unit intake für Inhalation ( $\text{Sv/Bq}$ ).

---

<sup>3</sup> Der Wert von  $0,04 \text{ mg m}^{-3}$  ist der in RP 65 angegebene Wert. Dabei handelt es sich aber um einen Schreibfehler, denn in den Rechnungen wurde ein Wert von  $0,033 \text{ mg m}^{-3}$  verwendet /HPA 11/.

### 2.3.1.5 Szenario A1.5: Ingestion durch Kontamination der Hände

Bei diesem Szenario wird unterstellt, dass sich mit Radionukliden kontaminierter Staub mit einer Konzentration von  $0,04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  auf Arbeitsflächen ablagert. Die unterstellte Raumgröße liegt bei  $32 \text{ m}^3$  und es wird weiterhin unterstellt, dass sich der gesamte enthaltene Staub am Tag ablagert, so dass insgesamt  $1,28\cdot 10^{-3} \text{ g}$  pro Tag anfallen. Für einen Arbeiter, der 250 Tage im Jahr arbeitet und über die Kontamination der Hände je Tag 10 % des Staubs aufnimmt, führt dies zu einer Masse von 32 mg, die pro Jahr aufgenommen wird<sup>4</sup>.

Die effektive Dosis  $E$  durch Ingestion von Staub, der Radionuklide beinhaltet, wird berechnet durch:

$$E = C \cdot \text{ING} \cdot R_9 \quad (2.11)$$

mit

$C$	Aktivitätskonzentration (Bq/g),
$\text{ING}$	Jährliche Ingestionsrate von kontaminiertem Material (32 mg/y),
$R_9$	Effektive Dosis per unit intake für Ingestion (Sv/Bq).

### 2.3.2 Accidental Workplace Szenarien

In *Accidental Workplace* Szenarien werden Expositionen berücksichtigt, die aufgrund von Unfällen bzw. durch falsche Handhabung am Arbeitsplatz auftreten. Dabei werden externe und interne Expositionspfade (Ingestion und Inhalation) berücksichtigt, die auch bei den *Normal Use Workplace* Szenarien enthalten sind. Die Kombination von Dosisrate, Expositionszeit und Eintrittswahrscheinlichkeit bei den *Accidental Workplace* Szenarien führt insgesamt zu mittleren jährlichen Dosen, die unterhalb der Dosen durch die *Normal Workplace* Szenarien liegen. Demnach sind die *Accidental Workplace* Szenarien durch die *Normal Workplace* Szenarien abdeckend beschrieben.

---

<sup>4</sup> Die Werte von  $1,28\cdot 10^{-3} \text{ g}$  abgelagertem Staub pro Tag und einem Anteil von 10%, der verzehrt wird, sind die in RP 65 angegebenen Werte. Tatsächlich wurden  $1,25\cdot 10^{-3} \text{ g}$  und 1% verwendet, wodurch sich eine Gesamtverzehrsmenge von  $3\cdot 10^{-3} \text{ g}$  ergibt /HPA 11/.

### 2.3.3 *Disposal (public) Szenarien*

In *disposal (public)* Szenarien werden Expositionen berücksichtigt, die dadurch auftreten, dass radioaktives Material auf eine (Müll-)Deponie gebracht wird. Auf dieser Deponie kann sich eine Einzelperson der Bevölkerung aufhalten, z. B. um dort selbst Müll abzuliefern, oder eine Einzelperson könnte in der Nähe der Deponie wohnen.

Von der Deponie wird angenommen, dass sie relativ klein ist, sich lediglich über 0,01 km<sup>2</sup> erstreckt und eine Kapazität von 1,5·10<sup>7</sup> kg besitzt. Zwischen Gebrauch des Radionuklides und der Deponierung wird eine Zeitspanne von 24 Stunden veranschlagt, während der das Nuklid zerfällt. Während der Expositionszeit wird konservativ eine konstante (verbliebene) Aktivität angenommen. Als unbeabsichtigter (*accidental*) Expositionspfad werden die externe Exposition und die Inhalation betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass diese unbeabsichtigten Expositionen auftreten wird mit 1 % veranschlagt. Die Ingestion wird hingegen als normaler (*normal*) Expositionspfad eingeordnet.

#### 2.3.3.1 Szenario A3.1: Externe Exposition auf einer Deponie

Für die Berechnung der externen Exposition auf einer Deponie wird eine Einzelperson der Bevölkerung betrachtet, die sich insgesamt 300 Stunden pro Jahr auf einer Deponie aufhält. Bei der Berechnung der Dosis wird eine externe Gamma-Strahlung unterstellt.

Damit ergibt sich für die mittlere effektive Dosis  $E$  pro Jahr:

$$E = C_D \cdot T \cdot GAM \cdot R_1 \cdot s \quad (2.12)$$

mit

$C_D$	verdünnte Aktivitätskonzentration (Bq/g),
$T$	Expositionszeit (300 h/a),
$GAM$	effektive Dosisrate 1m oberhalb einer infinit dicken Platte mit 1 Bq/g pro MeV Gamma Energie ( $3 \cdot 10^{-7}$ Sv/h je Bq/g MeV),
$s$	Wahrscheinlichkeit einer Exposition pro Jahr ( $0,01 \text{ a}^{-1}$ )
$R_1$	mittlere Photonenenergie pro Zerfall (MeV).

Wobei für  $C_D$  gilt:

$$C_D = C \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot DECA Y \quad (2.13)$$

und

$C$	Aktivitätskonzentration (1·Bq/g),
$M_1$	Masse der Quelle (100 g; typische Masse, die für alle Abfallformen ausgenommen gasförmige Quellen benutzt wird)
$M_2$	Masse der Deponie ( $1,5 \cdot 10^{10}$ g)
$DECAY$	Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist

Für  $DECAY$  gilt:

$$DECAY = \exp\left(-\ln(2) \cdot 24 \cdot \frac{3600}{R_{30}}\right) \quad (2.14)$$

Wobei  $R_{30}$  die Halbwertszeit des jeweiligen Nuklids in Sekunden bezeichnet.

### 2.3.3.2 Szenario A3.2: Inhalation von Staub von einer Deponie

Bei der Berechnung dieses Pfades wird für eine Einzelperson der Bevölkerung eine Exposition unterstellt, die durch Inhalation von Stäuben beim Betreten eines kontaminierten Bodens auf einer Deponie verursacht wird. Dabei wird eine Expositionszeit von einer Stunde pro Jahr und eine luftgetragene Staubkonzentration von  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  angenommen.

Die mittlere effektive Dosis  $E$  pro Jahr durch Inhalation von Stäuben von einer Deponie wird demnach berechnet durch:

$$E = C_D \cdot T \cdot INH \cdot R_{10} \cdot Dust \cdot s \quad (2.15)$$

mit

$C_D$	verdünnte Aktivitätskonzentration (Bq/g),
$T$	Expositionszeit (1 h/a),
$INH$	Atemrate ( $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ),
$Dust$	luftgetragene Staubkonzentration ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ g}/\text{m}^3$ ),
$s$	Wahrscheinlichkeit einer Exposition pro Jahr ( $0,01 \text{ a}^{-1}$ ),
$R_{10}$	Effektive Dosis je Aufnahme für Inhalation (Sv/Bq).

Wobei für  $C_D$  gilt:

$$C_D = C \cdot \frac{M_1}{M_2} \quad (2.16)$$

und

$C$	Aktivitätskonzentration (1·Bq/g),
$M_1$	Masse der Quelle (100 g; typische Masse, die für alle Abfallformen außer gasförmigen Quellen benutzt wird)
$M_2$	Masse der Deponie ( $1,5 \cdot 10^{10}$ g)

### 2.3.3.3 Szenario A3.3: Ingestion eines Objektes von einer Deponie

Bei dem Berechnungspfad Ingestion auf einer Deponie wird von der Annahme ausgegangen, dass eine Einzelperson der Bevölkerung beim Aufenthalt auf einer Deponie versehentlich einen Teil einer Quelle und damit einen Teil der Aktivität inkorporiert. Das Szenario beinhaltet beispielsweise das Auffinden einer Quelle oder eines Objektes, das mit einer Quelle in Kontakt gekommen ist und in Folge dessen kontaminiert ist, oder auch die Ingestion von kontaminiertem Erdreich, das auf die Hände gelangt ist. Es wird unterstellt, dass insgesamt 1 g der Quelle pro Jahr über Ingestion aufgenommen wird.

Anhand der vorangestellten Annahme ergibt sich die mittlere effektive Dosis  $E$  pro Jahr für die Ingestion eines Objektes von einer Deponie durch:

$$E = C \cdot M_1 \cdot f \cdot R_9 \cdot DECAFY \quad (2.17)$$

mit

$C$	Aktivitätskonzentration (1 Bq/g),
$f$	Anteil der aufgenommenen Quelle im Jahr ( $1 \cdot 10^{-2}$ ),
$M_1$	Masse der Quelle (100 g),
$DECAFY$	Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist,
$R_9$	Effektive Dosis je Aufnahme für Ingestion (Sv/a).



Für *DECAY* gilt:

$$DECAY = \exp(-\ln(2) \cdot 24 \cdot \frac{3600}{R_{30}}) \quad (2.18)$$

Wobei  $R_{30}$  für die Halbwertszeit des jeweiligen Nuklids in Sekunden steht.

## 2.4 Aktivitäten

### 2.4.1 Normal Use (Workplace) Szenarien

Die Normal Use Workplace Szenarien für die Berechnung der Aktivitäten berücksichtigen die externe Exposition für den Arbeiter aufgrund seiner Tätigkeit. Wie bei den Aktivitätskonzentrationen werden lediglich die Dosen für die Person/Personen berechnet, die die Quelle handhaben.

#### 2.4.1.1 Szenario B1.1: Externe Exposition durch eine Punktquelle

Bei der Berechnung der Dosis für diesen Expositionspfad wird unterstellt, dass der Arbeiter in der Nähe einer kleinen Quelle arbeitet, die durch eine Punktquelle in 1 m Abstand beschrieben wird.

Die effektive Dosis  $E$  durch die externe Exposition von einer Punktquelle wird berechnet durch:

$$E = A \cdot T \cdot (R_{19} + R_{20}) \quad (2.19)$$

mit

$A$       Aktivität der Quelle (1 Bq),

$T$       Expositionszeit (100 h/a für Flüssigkeiten und dispergierbare Stoffe, 200 h/a für nicht dispergierbare Stoffe, gekapselte Quellen und Folien),

$R_{19}$     effektive Dosisrate für Gamma-Strahlung einer 1 Bq Punktquelle im Abstand von 1 m (Sv/h pro Bq),

$R_{20}$     effektive Dosisrate für Beta-Strahlung einer 1 Bq Punktquelle im Abstand von 1 m (Sv/h pro Bq).

### 2.4.1.2 Szenario B1.2: Externe Exposition durch Handhabung einer Quelle

Bei der externen Exposition durch Handhabung einer Quelle wird davon ausgegangen, dass die Quelle für 2-3 Minuten eines Arbeitstages unmittelbar gehandhabt wird. Beispiele für solche Situationen sind:

4. Handhabung kleiner Quellen; beispielsweise Positionieren kleiner Quellen bei der Kalibrierung von Instrumenten.
5. Verpacken von radioaktiven Quellen oder radioaktivem Material.
6. Herstellung kleiner radioaktiver Komponenten; beispielsweise Konstruktion von Bauteilen aus Uran.

Bei der Handhabung wird unterstellt, dass die Quelle von den Fingern oder der Handinnenfläche umschlossen wird. Für die Hautdicke wird ein Wert von 400 µm angenommen. Für Beta-Strahlung wurde bei den Berechnungen der Dosisratenfaktor für 400 µm verwendet und für Gamma-Strahlung der Dosisratenfaktor für eine Hautdicke von 70 µm benutzt. Weiterhin wird angenommen, dass Glasampullen, die Flüssigkeiten enthalten, Beta-Strahlung durch eine Wandstärke von 150 mg·cm<sup>-2</sup> abschwächen.

Die effektive Dosis  $E$  berechnet sich aus der Hautdosis  $H_{\text{Skin}}$  bei Kontakt mit der Quelle durch:

$$H_{\text{Skin}} = A_s \cdot T \cdot (R_7 + R_{24}/SF) \quad (2.20)$$

und

$$E = H_{\text{Skin}} \cdot w_{\text{Skin}} \cdot \frac{\text{CONTACT}}{\text{BODY}} \quad (2.21)$$

mit

$A_s$	Aktivität pro Flächeneinheit (Bq/cm <sup>2</sup> ),
$T$	Expositionszeit (10 h/a für alle Quellen),
$R_7$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis für Gamma irradiation (7 mg/cm <sup>2</sup> ) (Sv/h pro Bq/cm <sup>2</sup> ),
$R_{24}$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis für Beta irradiation (40 mg/cm <sup>2</sup> ) (Sv/h pro Bq/cm <sup>2</sup> ),
$SF$	Abschirmfaktor (nur bei Flüssigkeiten ≠1)

wobei  $SF = 1$  ist für dispergierbare Stoffe, für abgedichtete gasförmige Quellen und bei gekapselten Quellen und Folien. Bei Flüssigkeiten gilt für  $SF$  hingegen folgende Formel:

$$SF = \exp(\mu \cdot d) \quad (2.22)$$

mit

$$\mu = 0,017 \cdot E_{\beta\text{max}}^{-1,14}$$

$$d = 150 \text{ mg/cm}^2$$

Für  $As$  gilt:

$$As = \frac{A}{CONTACT} \quad (2.23)$$

mit

$A$  Aktivität der Quelle (1 Bq),

$CONTACT$  Kontaktfläche zwischen Haut und Quelle ( $\text{cm}^2$ ).

wobei für  $CONTACT$  gilt:

$$CONTACT = \frac{M}{\rho \cdot t/2} = \frac{M}{U} \quad (2.24)$$

mit

$M$  Masse der Quelle (g),

$\rho$  Dichte der Quelle ( $\text{g/cm}^3$ ).

$t/2$  halbe Dicke der Quelle (cm)

Für die einzelnen Parameter gilt nach RP 65 Tabelle S. 49 die in Tabelle Tab. 2.5 aufgeführten Werte.

**Tab. 2.5** Parameter für die einzelnen Quelltypen

Quelltyp	$M$ (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$t/2$ (cm)	$U$ (g/cm <sup>2</sup> )
flüssig	10	1,0	0,5	0,5
dispergierbar	30	1,12	0,15	0,168
gekapselt	$8,00 \cdot 10^{-4}$	5,0	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$
Folie <sup>5</sup>	$4,00 \cdot 10^{-4}$	5,0	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$
gasförmig	$6,15 \cdot 10^{-4}$	-	-	$1,23 \cdot 10^{-3}$

Für die effektive Dosis gilt:

$$E = H_{\text{Skin}} \cdot w_{\text{Skin}} \cdot \frac{\text{CONTACT}}{\text{BODY}} \quad (2.25)$$

mit

$w_{\text{Skin}}$  Wichtungsfaktor Haut (0,01),

$BODY$  Hautoberfläche Körper (10 000 cm<sup>2</sup>).

#### 2.4.2 *Accidental Workplace Szenarien*

Die *Accidental Workplace* Szenarien berücksichtigen Expositionen in Folge von Unfällen und fehlerhaften Anwendungen am Arbeitsplatz. Für den Arbeiter werden interne und externe Expositionspfade berechnet, die auf zwei Basissituationen beruhen:

- Verschütten (Flüssigkeiten) bzw. Verteilen (dispergierbare Feststoffe) von Radionukliden
- Inhalation von kontaminierten luftgetragenen Stoffen bei einem Brand

---

<sup>5</sup> Bei dem in der Tabelle für die halbe Dicke der Quelle angegebenen Wert handelt es sich um den Wert aus RP 65. Laut /HPA 11/ beträgt die halbe Dicke der Folie allerdings  $4,0 \cdot 10^{-5}$  cm.

Für die meisten Pfade, die auf Verschütten bzw. Verteilen von Radionukliden beruhen, wird bei Flüssigkeiten eine Masse von 10 g unterstellt und bei dispergierbaren Stoffen eine Masse von 30 g. Der Pfad B2.5 bildet eine Ausnahme; es wird hierbei eine Masse der Quelle von 100 g unterstellt.

Bei der Berechnung der Freigrenzen wurden die beiden Basis-Szenarien Verschütten und Brand getrennt betrachtet<sup>6</sup>.

#### 2.4.2.1 Szenario B2.1: Externe Exposition durch Kontamination der Hände

In diesem Szenario wird angenommen, dass in einer Unfallsituation eine radioaktive Flüssigkeit bzw. ein Pulver über eine Arbeitsfläche verschüttet bzw. verteilt wird und insgesamt 10 % davon die Rückseite der Hände bzw. einen Teil der Arme der arbeitenden Person kontaminieren. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Arbeiter dies über einen Zeitraum von 10 Minuten nicht bemerkt, bevor die Kontamination vollständig abgewaschen wird.

Der Wert  $H_{Skin}$  wird berechnet durch:

$$H_{Skin} = A_s \cdot T \cdot (R_7 + R_8) \cdot s \quad (2.26)$$

mit

$H_{Skin}$	Hautäquivalentdosis (in Sv/a)
$A_s$	Aktivität je Flächeneinheit (1 Bq/cm <sup>2</sup> )
$T$	Expositionszeit (0,16 h/a).
$R_7$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis, for gamma irradiation (7 mg/cm <sup>2</sup> ) in (Sv/h je Bq/cm <sup>2</sup> )
$R_8$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis, for beta irradiation (4 mg/cm <sup>2</sup> ) in (Sv/h je Bq/cm <sup>2</sup> )
$s$	Wahrscheinlichkeit einer Exposition im Jahr (0,01 a <sup>-1</sup> )

---

<sup>6</sup> Diese Bemerkung (getrennte Betrachtung von Verschütten und Brand) findet sich in RP 65. Laut /HPA 11/ wurden bei der Berechnung der Freigrenzen aber beide Basis-Szenarien zusammengefasst.

Für  $A_s$  gilt:

$$A_s = \frac{A \cdot f}{CONTACT} = \frac{A \cdot f}{(M \cdot f) / (\rho \cdot t)} = \frac{A \cdot f}{m/U} \quad (2.27)$$

mit

- $A$             Aktivität der Quelle vor dem Austritt von Aktivität (1 Bq)  
 $f$             Anteil der ausgetretenen Aktivität, die auf die Hände übertragen wurde  
 (=0,1)  
 $M_{\text{liquid/solid}}$     Masse der Quelle vor dem Austritt von Aktivität (g)  
 $m_{\text{liquid/solid}}$     Masse der Quellanteile auf den Händen (g)  
 $t$             Dicke der Deposition auf der Haut (0,01 cm)  
 $\rho_{\text{liquid/solid}}$     Dichte der Deposition auf der Haut (g/cm<sup>3</sup>)  
 $CONTACT$     Kontaktfläche zwischen Haut und ausgetretener Aktivität (cm<sup>2</sup>)

Für Flüssigkeiten (liquid) und Feststoffe (solid) ergeben sich für  $CONTACT$  die folgenden Werte aus Tab. 2.6.

**Tab. 2.6**    Werte für  $CONTACT$

	liquid	solid
$M_{\text{liquid/solid}}$ (g)	10	30
$m_{\text{liquid/solid}}$ (g)	1	30
$\rho_{\text{liquid/solid}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1	0,5
$CONTACT$ (cm <sup>2</sup> )	100	600

$$E = H_{\text{Haut}} \cdot w_{\text{Haut}} \cdot \frac{CONTACT}{A_{\text{Körper}}} \quad (2.28)$$

mit

- $w_{\text{Haut}}$             Wichtungsfaktor Haut (0,01),  
 $A_{\text{Körper}}$             Hautoberfläche Körper (10.000 cm<sup>2</sup>).

### 2.4.2.2 Szenario B2.2: Externe Exposition durch ein kontaminiertes Gesicht

Die Berechnung der effektiven Dosis durch externe Exposition des kontaminierten Gesichts erfolgt analog zu den Berechnungen von B2.1 (siehe 2.4.2) wobei für  $A_S$  gilt:

$$A_S = \frac{A}{CONTACT} \cdot f \quad (2.29)$$

mit  $f = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01$ , so dass 10 % des Quellanteils der sich auf Händen und Armen nach Szenario B2.1 befindet, auf das Gesicht übertragen wird. Die Kontamination verbleibt - wie in Szenario B2.1 - für 10 Minuten im Gesicht und für die Haut wird ebenfalls eine Dicke von 40  $\mu\text{m}$  unterstellt. Für die Beta- und Gamma-Strahlung werden die gleichen Dosisfaktoren unterstellt. Die Masse der Quelle wird im Fall einer Flüssigkeit mit 10 g und im Fall eines Feststoffes mit 30 g angegeben. Für die Deposition wird eine Dicke von  $1 \cdot 10^{-3}$  cm angenommen.

### 2.4.2.3 Szenario B2.3: Externe Exposition durch kontaminierte Oberflächen

In diesem Szenario wird eine Situation betrachtet, in der eine radioaktive Lösung bzw. ein radioaktives Pulver auf einer Oberfläche unbemerkt verteilt wird. Insgesamt wird für die Kontamination der Oberfläche von einer kreisförmigen Verteilung mit einem Radius von 1,5 m ausgegangen, so dass die Gesamtfläche etwa  $7 \text{ m}^2$  beträgt. Für die exponierte Person werden ein Abstand von 1 m zur kontaminierten Oberfläche und eine Expositionszeit von 10 Minuten unterstellt, bevor die Kontamination bemerkt wird. Da die kontaminierte Oberfläche begrenzt ist, fließt in die Berechnung ein geometrischer Faktor ein, der die Dosis, die auf der Grundlage des Dosisfaktors für eine unendlich ausgedehnte Fläche basiert, entsprechend reduziert.

Die Berechnung der mittleren effektiven Dosis  $E$  pro Jahr durch die externe Exposition einer ausgelaufenen bzw. auf einer Oberfläche verteilten Quelle erfolgt demnach anhand der folgenden Formel:

$$E = A_S \cdot T \cdot (R_5 + R_6) \cdot GEOM \cdot s \quad (2.30)$$

mit

$A_S$	Aktivität pro Fläche beim Austritt von Aktivität ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )
$T$	Expositionszeit (0,16 h)

$R_5$	effective dose rate 1 m above an infinite plane for gamma irradiation (Sv/h je Bq/m <sup>2</sup> )
$R_6$	effective dose rate 1 m above an infinite plane for beta irradiation (Sv/h je Bq/m <sup>2</sup> )
$GEOM$	geometrischer Faktor für eine kontaminierte Fläche mit einem Radius von 1,5 m im Verhältnis zu einer unendlichen Fläche (0,1)
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr (0,01)

mit

$$As = \frac{A}{AREA} \quad (2.31)$$

und

$A$  Aktivität der Quelle (1 Bq),

$AREA$  kontaminierte Fläche (7 m<sup>2</sup>).

#### 2.4.2.4 Szenario B2.4: Ingestion über kontaminierte Hände

Bei diesem Berechnungspfad wird von einer radioaktiven Flüssigkeit bzw. einem radioaktiven Pulver ausgegangen, von welchem 1 mg unabsichtlich durch Ingestion über die Hände aufgenommen wird ( $1 \cdot 10^{-5}$  der gesamten Aktivität).

Die effektive Dosis  $E$  für die Ingestion durch kontaminierte Hände berechnet sich folgendermaßen:

$$E = A \cdot f \cdot R_9 \cdot s \quad (2.32)$$

mit

$A$  Aktivität der Quelle (1 Bq)

$f$  Anteil der über Ingestion aufgenommenen Aktivität bei spillage ( $1 \cdot 10^{-5}$ )

$R_9$  Committed effective dose per unit intake for ingestion (Sv/Bq)

$s$  Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr (0,01 a<sup>-1</sup>)



#### 2.4.2.5 Szenario B2.5: Inhalation von resuspendierender Aktivität

In diesem Szenario wird die Verteilung einer radioaktiven Flüssigkeit bzw. eines radioaktiven Pulvers unterstellt und davon ausgegangen, dass über die Inhalation von Stäuben bzw. Aerosolen eine Exposition über einen Zeitraum von 10 Minuten eintritt. Die Masse der verteilten Quelle beträgt dabei 100 g und die Staubkonzentration  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Die effektive Dosis  $E$  für die Inhalation durch resuspendierende Aktivität berechnet sich folgendermaßen:

$$E_c = A \cdot T \cdot INH \cdot R_{10} \cdot Dust \cdot s \cdot \frac{1}{M} \quad (2.33)$$

mit

$A$	Aktivität der Quelle (1 Bq)
$T$	Expositionszeit (0,16 h)
$INH$	Atemrate (1 $\text{m}^3/\text{h}$ )
$R_{10}$	Effektive Folgedosis pro unit intake für Inhalation (Sv/Bq)
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr ( $0,01 \text{ a}^{-1}$ )
$M$	Masse der verschütteten/verteilten Quelle (100 g)
$Dust$	Konzentration des luftgetragenen Staubs ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ g m}^{-3}$ )

#### 2.4.2.6 Szenario B2.6: Externe Exposition von einer Aerosol- oder Staubwolke

In diesem Szenario wird von einer Aerosol bzw. Staubwolke ausgegangen, die in Folge der Verschüttung bzw. Verteilung einer radioaktiven Lösung (Flüssigkeit) bzw. Quelle (dispergierbarer Feststoff) auftritt. Es wird eine gleichförmige Dispersion innerhalb eines Raumvolumens von  $32 \text{ m}^3$  unterstellt, die über 10 Minuten anhält. Dabei wird eine externe Exposition für einen Expositionszeitraum von 10 Minuten angenommen.

Für die radioaktive Lösung wird unterstellt, dass durch Verdampfen die gesamte Masse im Raum verteilt wird; der luftgetragene Anteil radioaktiver Stoffe wird durch die Flüchtigkeit der jeweiligen Radionuklide bestimmt.

Für den dispergierbaren Feststoff wird unterstellt, dass eine luftgetragene Staubkonzentration von  $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  auftritt, was bei einer Masse der Quelle von 30 g und der unterstellten Raumgröße von  $32 \text{ m}^3$  einem Anteil von 0,53 % entspricht.

Die effektive Dosis  $E$  für die externe Exposition durch Aerosole oder eine Staubwolke berechnet sich demnach folgendermaßen:

$$E = \frac{\chi \cdot T \cdot ((R_1 \cdot CF1) + (R_2 \cdot CF2 \cdot w_{\text{skin}})) \cdot s}{h} \quad (2.34)$$

wobei

$\chi$	Aktivität pro Luftvolumen ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$T$	Expositionszeit (0,16 h)
$R_1$	Mittlere Gamma Energie pro Zerfall (MeV)
$CF1$	Effektive Dosisrate in einer semi-infiniten Wolke für $1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ pro MeV Gamma Energie ( $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ (Sv}\cdot\text{y}^{-1})$ pro ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MeV}$ ))
$R_2$	Mittlere Beta Energie pro Zerfall (MeV)
$CF2$	Hautäquivalente Dosisrate in einer semi-infiniten Wolke für $1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ pro MeV Beta Energie ( $2 \cdot 10^{-6} \text{ (Sv}\cdot\text{y}^{-1})$ pro ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MeV}$ ))
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr ( $0,01 \text{ a}^{-1}$ )
$w_{\text{skin}}$	Gewichtungsfaktor Haut (0,01)
$h$	Stundenzahl im Jahr ( $8760 \text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ )

Die Aktivität pro Luftvolumen  $\chi$  berechnet sich nach folgenden Formeln:

a) für Flüssigkeiten:

$$\chi = \frac{A \cdot f \cdot V}{VOL} = A \cdot U \cdot V \quad (2.35)$$

b) für dispergierbare Feststoffe:

$$\chi = \frac{A \cdot f}{VOL} = A \cdot U \quad (2.36)$$

wobei:

$A$	Aktivität der Quelle (1 Bq)
$f$	Anteil der dispergierten Quelle im Raum (1 für Flüssigkeiten; $5,3 \cdot 10^{-3}$ für Feststoffe (angenommener Wert für eine kleine Quelle))
$V$	Flüchtigkeit des Radionuklids
$VOL$	Volumen des Raumes in dem die Quelle dispergiert ( $32 \text{ m}^3$ (typische Raumgröße für ein Labor))

#### 2.4.2.7 Szenario B2.7: Kontamination der Haut im Brandfall

In diesem Berechnungspfad wird eine kontaminationsbedingte Exposition der Haut durch ein Feuer innerhalb eines Raumes betrachtet. Dabei wird für radioaktive Flüssigkeit ein Anteil von 100 % und für alle anderen Stoffe ein Anteil von 1 % der radioaktiven Quelle unterstellt, der im Brandfall in Asche umgesetzt wird. Bei der Kontamination der Haut wird davon ausgegangen, dass sich die Asche über eine große Fläche mit einer Dicke von 0,1 mm verteilt und die kontaminierte Hautfläche  $100 \text{ cm}^2$  beträgt. Für die Expositionszeit werden 10 Minuten unterstellt. Für die Hautdicke wird wie in B2.1 ein Wert von  $40 \text{ }\mu\text{m}$  angenommen, was beispielsweise einer Kontamination an der Rückseite der Hände oder im Gesicht entspricht.

Die Berechnung der effektiven Dosis  $E$  für die Kontamination der Haut erfolgt dementsprechend über die Berechnung der Hautdosis  $H_{\text{skin}}$ :

$$H_{\text{skin}} = A_s \cdot T \cdot (R_7 + R_8) \cdot s \quad (2.37)$$

wobei:

$A_s$	Aktivität pro Flächeneinheit bei Brandeintritt ( $1 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
$T$	Expositionszeit bei Brandeintritt (0,16 h)
$R_7$	äquivalente Hautdosisrate to basal layer of skin epidermis for gamma irradiation ( $7 \text{ mg cm}^{-2}$ ) ( $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ pro $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
$R_{10}$	äquivalente Hautdosisrate to basal layer of skin epidermis for beta irradiation ( $4 \text{ mg cm}^{-2}$ ) ( $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ pro $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr ( $0,01 \text{ a}^{-1}$ )

Für  $A_s$  gilt dabei folgendes:

$$A_s = \frac{A \cdot f}{AREA} \quad (2.38)$$

wobei:

- $A$             Aktivität der Quelle vor Brandeintritt (1 Bq)  
 $f$             Anteil der Quelle, der in Asche bzw. Wasserdampf umgesetzt wird (1 für Flüssigkeiten; 0,01 für alle anderen Formen)  
 $AREA$        Teil der Oberfläche, der mit Asche/Wassertropfen kontaminiert ist ( $\text{cm}^2$ )

$AREA$  wird berechnet durch:

$$AREA = \frac{M \cdot f}{\rho \cdot t} = \frac{m}{U} \quad (2.39)$$

wobei:

- $M$             Masse der Quelle vor Entzündung (100 g für alle Stoffformen)  
 $f$             Anteil der Quelle, der zu Asche verbrannt ist (1 für Flüssigkeiten; 0,01 für alle anderen Formen)  
 $\delta$             Dichte der Deposition auf der Oberfläche ( $5 \cdot 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )  
 $t$             Dicke der Deposition ( $1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$ )  
 $m$             Masse des verbrannten Materials, das die Deposition bildet ( $1 \cdot 10^2 \text{ g}$  für Flüssigkeiten; 1 g für alle anderen Stoffformen)

Die effektive Dosis, die aus der Kontamination der Haut mit der Asche resultiert, wird über  $H_{\text{skin}}$  berechnet durch:

$$E = H_{\text{skin}} \cdot w_{\text{skin}} \cdot \frac{CONTACT}{BODY} \quad (2.40)$$

Mit den Größen:

- $w_{\text{skin}}$        Gewichtungsfaktor Haut (0,01)  
 $CONTACT$     kontaminierte Hautfläche ( $100 \text{ cm}^2$ )  
 $BODY$         Körperfläche ( $10\,000 \text{ cm}^2$ )

#### 2.4.2.8 Szenario B2.8: Inhalation von Staub oder flüchtigen Stoffen

In diesem Szenario wird das gleiche Laborfeuer wie in B2.7 unterstellt, wobei eine Inhalation der Verbrennungsprodukte über einen Zeitraum von 10 Minuten angenommen wird. Diese Situation kann auch noch eintreten, wenn das Feuer bereits gelöscht ist, jedoch weiterhin Verbrennungsprodukte in der Luft enthalten sind. Für das Szenario wird unterstellt, dass 100 % des verbrannten Materials (100 % für Gase und Flüssigkeiten; 1 % für alle anderen Stoffe) ein Raumvolumen von 32 m<sup>3</sup> füllen und mindestens 10 Minuten in der Luft verbleiben.

Die effektive Dosis  $E$  für die Inhalation von Aerosolen und Asche infolge eines unfallbedingten Feuers berechnet sich dann folgendermaßen:

$$E = \chi \cdot T \cdot INH \cdot R_{10} \cdot s \quad (2.41)$$

wobei:

$\chi$	Aktivität pro Luftvolumen (Bq·m <sup>-3</sup> )
$T$	Expositionszeit (0,16 h)
$INH$	Atemrate (1 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
$R_{10}$	Committed effective dose per unit intake for inhalation (Sv·Bq <sup>-1</sup> )
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr (0,01 a <sup>-1</sup> )

Die Aktivität pro Volumeneinheit ergibt sich aus der Aktivität, über

$$\chi = \frac{A \cdot f}{VOL} = A \cdot U \cdot f \quad (2.42)$$

wobei

$A$	Aktivität der Quelle vor Aufnahme (1 Bq)
$f$	Anteil der Quelle, der sich in der Asche befindet
$VOL$	Volumen des Raumes in dem die Aerosole bzw. Asche verteilt werden (=32 m <sup>3</sup> )

#### 2.4.2.9 Szenario B2.9: Externe Exposition durch Verbrennungsprodukte

In diesem Szenario wird unterstellt, dass das Feuer aus B2.7 eine Wolke bildet, die für mindestens 10 Minuten besteht und die aufgrund der enthaltenen Gamma- und Beta-Strahler eine externe Exposition verursacht. Dabei wird weiter angenommen, dass

100 % des verbrannten Materials ein Raumvolumen von 32 m<sup>3</sup> ausfüllen und die Konzentration der luftgetragenen Stoffe für 10 Minuten unverändert bleibt.

Die effektive Dosis  $E$  bei der Exposition durch Verbrennungsprodukte berechnet sich dann folgendermaßen:

$$E = \frac{\chi \cdot T \cdot ((R_1 \cdot CF1) + (R_2 \cdot CF2 \cdot w_{\text{skin}})) \cdot s}{h} \quad (2.43)$$

wobei:

$\chi$	Aktivität pro Luftvolumen (Bq·m <sup>-3</sup> ) im Brandfall
$T$	Expositionszeit (0,16 h)
$R_1$	Mittlere Gamma-Energie pro Zerfall (MeV)
$CF1$	Effektive Dosisrate in einer semi-infiniten Wolke für 1 Bq·m <sup>-3</sup> pro MeV der Gamma-Energie (= 1,6·10 <sup>-6</sup> (Sv·a <sup>-1</sup> ) pro (Bq·m <sup>-3</sup> ·MeV))
$R_2$	Mittlere Beta-Energie pro Zerfall (MeV)
$CF2$	Skin equivalent dose rate in a semi-infinite cloud for 1 Bq·m <sup>-3</sup> per MeV of Beta-energy (=2·10 <sup>-6</sup> (Sv·a <sup>-1</sup> ) per (Bq·m <sup>-3</sup> ·MeV))
$w_{\text{skin}}$	Gewichtungsfaktor Haut (0,01)
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr (0,01 a <sup>-1</sup> )
$h$	Stundenzahl im Jahr (8760 h·a <sup>-1</sup> )

Die Aktivität pro Luftvolumen  $\chi$  berechnet sich dabei nach folgender Formel:

$$\chi = \frac{A \cdot c}{VOL} = A \cdot U \cdot c \quad (2.44)$$

wobei

$A$	Aktivität der Quelle vor der Entzündung (1 Bq)
$f$	Anteil der Quelle der in Asche umgesetzt wird (1 für Flüssigkeiten; 0,01 für alle anderen Stoffformen)
$VOL$	Volumen des Raumes in dem Aerosole oder Asche dispergiert werden (32 m <sup>3</sup> )

### 2.4.3 *Disposal (public) Szenario*

In *disposal public* Szenarien werden normale und unbeabsichtigte Expositionen einer Person der Bevölkerung betrachtet, die sich auf einer Mülldeponie befindet, auf der das

betrachtete Radionuklid deponiert wurde. Es werden externe Exposition, Inhalation und Ingestion betrachtet. Der radioaktive Zerfall zwischen Gebrauch und Deponierung des Radionuklids wird berücksichtigt, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

#### 2.4.3.1 Szenario B3.1: Externe Exposition auf einer Deponie

Bei den Szenarien B3.X werden Situationen betrachtet, in denen eine Einzelperson der Bevölkerung beim Aufenthalt auf einer Deponie in Folge von normalen oder unfallbedingten Situationen exponiert wird. Dabei werden externe, Inhalations- und Ingestionspfade berücksichtigt.

Für die externe Exposition auf einer Deponie wird unterstellt, dass sich eine Einzelperson der Bevölkerung über einen Zeitraum von  $300 \text{ h} \cdot \text{y}^{-1}$  auf einer Deponie aufhält.

Die effektive Dosis  $E$  bei der externen Exposition durch eine Quelle auf einer Deponie berechnet sich demnach über folgende Formel:

$$E = C_D \cdot T \cdot (GAM \cdot R_1) \cdot s \quad (2.45)$$

mit

$C_D$	verdünnte Aktivitätskonzentration ( $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ )
$T$	Anteil der Expositionsstunden pro Jahr ( $300 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ )
$R_1$	Mittlere Gamma-Energie pro Zerfall (MeV)
$GAM$	effektive Dosisrate 1m oberhalb einer infinit dicken Platte mit $1 \text{ Bq/g}$ pro MeV Gamma Energie ( $3 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/h je (Bq/g MeV)}$ ),
$s$	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr ( $0,01 \text{ a}^{-1}$ )

wobei für  $C_D$  gilt:

$$C_D = \frac{A}{M} \cdot DECAF \quad (2.46)$$

mit

$A$	Aktivität der Quelle (1 Bq)
$M$	Masse der Deponie ( $= 1,5 \cdot 10^{10} \text{ g}$ )
$DECAF$	Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist (ohne Berücksichtigung von Tochternukliden).

und *DECAY* sich folgendermaßen berechnet:

$$DECAY = \exp(-\ln(2) \cdot 24 \cdot \frac{3600}{R_{30}}) \quad (2.47)$$

#### 2.4.3.2 Szenario B3.2: Inhalation von Staub auf einer Deponie

In diesem Expositionspfad werden zwei mögliche Situationen, in denen es zu einer Inhalation von radioaktiven Stoffen kommen kann, unterschieden. Dabei wird auch der radioaktive Zerfall über den Zeitraum von 24 h berücksichtigt.

**Fall1:** Eine Einzelperson der Bevölkerung inhaliert unfallbedingt beim Aufenthalt auf einer Deponie Staub von einer unverdünnten radioaktiven Quelle mit einer Masse von 1 g über einen Zeitraum von  $1 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ .

Die effektive Dosis *E* bei der unfallbedingten Inhalation von Staub beim Aufenthalt auf einer Deponie berechnet sich dann folgendermaßen:

$$E = \frac{A}{M} \cdot T \cdot INH \cdot R_{10} \cdot Dust \cdot s \cdot DECAY \quad (2.48)$$

mit

<i>A</i>	Aktivität der Quelle (1 Bq)
<i>M</i>	Masse der Quelle (= 1 g)
<i>T</i>	Expositionszeit falls Exposition eintritt (= 1 h)
<i>R<sub>10</sub></i>	Effektive Folgedosis pro unit intake für Inhalation (Sv·Bq <sup>-1</sup> )
<i>INH</i>	Atemrate (= 1 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
<i>Dust</i>	Konzentration luftgetragenen Staubs (= 1·10 <sup>-3</sup> g·m <sup>-3</sup> )
<i>s</i>	Wahrscheinlichkeit für eine Exposition pro Jahr (0,01 a <sup>-1</sup> )
<i>DECAY</i>	Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist (ohne Berücksichtigung von Tochternukliden)

**Fall 2:** In diesem Szenario wird angenommen, dass sich eine Einzelperson der Bevölkerung über einen Zeitraum von  $5000 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$  in der Nähe einer Deponie aufhält und Staub eingeatmet wird, wobei die radioaktive Quelle auf 100 kg des Bodens verteilt ist.



Die effektive Dosis  $E$  bei der langzeitigen Inhalation von Staub auf einer Deponie berechnet sich somit folgendermaßen:

$$E = C_D \cdot T \cdot INH \cdot R_{10} \cdot Dust \quad (2.49)$$

mit

$C_D$	Verdünnte Aktivitätskonzentration ( $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ )
$T$	Expositionszeit falls Exposition eintritt ( $= 5 \cdot 10^3 \text{ h}$ )
$R_{10}$	Effektive Folgedosis pro unit intake für Inhalation ( $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ )
$INH$	Atemrate ( $= 1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ )
$Dust$	Konzentration luftgetragenen Staubs; angenommener Wert für die Konzentration von Staub in der Luft ( $= 2 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

wobei für  $C_D$  gilt:

$$C_D = \frac{A}{M} \cdot DECAFY \quad (2.50)$$

mit

$A$	Aktivität der Quelle (1 Bq)
$M$	Masse des Abfalls in der die Quelle verdünnt ist ( $= 1 \cdot 10^5 \text{ g}$ )
$DECAFY$	Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist (ohne Berücksichtigung von Tochternukliden)

### 2.4.3.3 Szenario B3.3: Externe Exposition der Haut durch Handhabung eines Objektes von einer Deponie

In diesem Szenario wird für eine Einzelperson der Bevölkerung angenommen, dass sie beim Aufenthalt auf einer Deponie ein mit radioaktivem Material kontaminiertes Objekt mit einer Masse von 30 g auffindet und handhabt. Es wird davon ausgegangen, dass das Objekt anschließend über einen Zeitraum von 8 Stunden gehandhabt bzw. in einer Tasche aufbewahrt wird. Dabei wird aufgrund der abschirmenden Wirkung der Kleidung bzw. wegen der dickeren Hautschicht an der Handinnenseite mit einer Hautdicke von 400  $\mu\text{m}$  gerechnet. Die Dosis wird mit einer ähnlichen Methode wie in Szenario B1.2 berechnet.

Der Wert  $H_{\text{Skin}}$  wird berechnet sich demnach folgendermaßen:

$$H_{\text{Skin}} = A_s \cdot T \cdot (R_7 + R_{24}) \quad (2.51)$$

mit

$H_{\text{Skin}}$	Hautäquivalentdosis (in Sv/a)
$A_s$	Aktivität je Flächeneinheit (1 Bq/cm <sup>2</sup> )
$T$	Expositionszeit (25 h/a).
$R_7$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis, for gamma irradiation (7 mg/cm <sup>2</sup> ) in (Sv/h je Bq/cm <sup>2</sup> )
$R_{24}$	Skin equivalent dose rate to the basal layer of skin epidermis, for beta irradiation (40 mg/cm <sup>2</sup> ) in (Sv/h je Bq/cm <sup>2</sup> )
$s$	Wahrscheinlichkeit einer Exposition im Jahr (=0,01 a <sup>-1</sup> )

wobei

$$A_s = \frac{A}{\text{CONTACT}} \cdot \text{DECAY} \quad (2.52)$$

mit

$A$	Aktivität der Quelle (1 Bq)
$\text{DECAY}$	Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist (ohne Berücksichtigung von Tochternukliden)
$\text{CONTACT}$	Fläche der Haut, die mit der Quelle Kontakt hat (cm <sup>2</sup> )

und

$$\text{CONTACT} = \frac{M}{\rho / \frac{t}{2}} = \frac{M}{U} \quad (2.53)$$

wobei

$M$	Masse der Quelle (= 30 g für dispergierbare Feststoffe)
$\rho$	Dichte der Quelle (= 1,12 g/cm <sup>3</sup> )
$t/2$	halbe Dicke der Quelle (1,15·10 <sup>-1</sup> cm)

Die Effektivdosis der Haut  $E_{\text{Haut}}$  wird berechnet durch:

$$E_{\text{Skin}} = H_{\text{Skin}} \cdot w_{\text{Skin}} \cdot \frac{\text{CONTACT}}{\text{BODY}} \quad (2.54)$$

mit

$w_{\text{Skin}}$  Gewichtungsfaktor Haut (0,01)  
 $\text{BODY}$  Fläche der Haut (= 10 000 cm<sup>2</sup>)

#### 2.4.3.4 Szenario B3.4: Ingestion eines Objektes von einer Deponie

In diesem Szenario wird für eine Einzelperson der Bevölkerung angenommen, dass sie auf einer Deponie eine radioaktive Quelle bzw. ein mit radioaktivem Material kontaminiertes Objekt findet und dabei unabsichtlich einen Anteil von 0,1 % der Quelle über Ingestion aufnimmt.

Die effektive Dosis  $E$  bei der Ingestion eines Objektes von einer Deponie berechnet sich dann folgendermaßen:

$$E = A \cdot R_9 \cdot f \cdot \text{DECAY} \quad (2.55)$$

wobei

$A$  Aktivität der Quelle (1 Bq)  
 $R_9$  Committed effective dose per unit intake for ingestion (Sv·Bq<sup>-1</sup>)  
 $f$  Anteil der durch Ingestion aufgenommenen Quelle (=1·10<sup>-3</sup>)  
 $\text{DECAY}$  Anteil des Mutternuklids, der nach 24 Stunden noch vorhanden ist (ohne Berücksichtigung von Tochternukliden)

### 3 Programmentwicklung zur Berechnung der Freigrenzen

Zur Berechnung der Freigrenzen wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das auf den im vorherigen Kapitel vorgestellten Expositionsszenarien nach RP 65 basiert und mittels VBA-Programmierung in MS-Excel 2010 umgesetzt ist. Dabei wurden die in /HPA 11/, Anhang E, erwähnten Korrekturen der (Tipp-)Fehler berücksichtigt:

- Pfad A1.4 (Kapitel 2.3.1.4): Die Staubkonzentration beträgt  $0,033 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Pfad A1.5 (Kapitel 2.3.1.5). Es werden 1 % des abgelagerten Staubes ( $1,25\cdot 10^{-5} \text{ g}$  pro Tag) verzehrt. Damit ergibt sich eine Gesamtmasse von  $3\cdot 10^{-3} \text{ g}$  pro Jahr.
- Pfad B1.2 (Kapitel 2.4.1.2): Die halbe Dicke der Folienquelle beträgt  $4\cdot 10^{-5} \text{ cm}$ .
- *Accidental Workplace* Szenarien für Aktivitäten (Kapitel 2.4.2): Die Basis-szenarien Brand und Verschütten werden bei der Dosis- bzw. Freigrenzen-berechnung zusammengefasst.

Weitere Korrekturen betreffen die Zahlenwerte für die nuklidabhängigen Parameter aus der Tabelle B1 aus RP 65. Die korrigierten Werte sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

**Tab. 3.1** Nach /HPA 11/ korrigierte nuklidabhängige Parameter

Radionuklid	Nuklidabhängiger Parameter	Korrigierter Zahlenwert
Bk-249	R <sub>7</sub>	$1\cdot 10^{-14}$
Ce-144	R <sub>9</sub>	$8,9\cdot 10^{-9}$
Cf-254	R <sub>1</sub>	$4,03\cdot 10^{-6}$
	R <sub>2</sub>	$1,85\cdot 10^{-4}$
	R <sub>7</sub>	0
	R <sub>8</sub>	0
	R <sub>19</sub>	$1\cdot 10^{-17}$
	R <sub>20</sub>	0
	R <sub>24</sub>	0
Co-58	R <sub>10</sub>	$5\cdot 10^{-9}$
I-131	R <sub>1</sub>	0,38

Radionuklid	Nuklidabhängiger Parameter	Korrigierter Zahlenwert
Entgegen der Bemerkung in /HPA 11/ entspricht die damit berechnete Freigrenze für Aktivitätskonzentrationen mit dem korrigierten Wert nicht mehr dem in RP 65 veröffentlichten ungerundeten Wert. Statt 53,8 Bq/g ergibt sich 43,6 Bq/g		
Kr-79	R <sub>7</sub>	1,54·10 <sup>-8</sup>
Kr-81	R <sub>7</sub>	7,08·10 <sup>-10</sup>
Kr-85	R <sub>7</sub>	1,3·10 <sup>-10</sup>
	R <sub>24</sub>	5,1·10 <sup>-7</sup>
Pb-210+	R <sub>5</sub> + R <sub>6</sub>	1,32·10 <sup>-13</sup>
Sm-151	R <sub>2</sub>	1,97·10 <sup>-2</sup>
Te-125m	R <sub>1</sub>	3,55·10 <sup>-2</sup>
	R <sub>2</sub>	1,09·10 <sup>-1</sup>
	R <sub>19</sub>	3,55·10 <sup>-15</sup>
Entgegen der Bemerkung in /HPA 11/ entspricht die damit berechnete Freigrenze für Aktivitätskonzentrationen mit den korrigierten Werten nicht mehr dem in RP 65 veröffentlichten ungerundeten Wert. Statt 1460 Bq/g ergibt sich 466 Bq/g		
U-235	R <sub>5</sub> + R <sub>6</sub>	5,96·10 <sup>-13</sup>
W-185	R <sub>9</sub>	8,3·10 <sup>-10</sup>
		Wird für alle physikalischen Formen verwendet
Xe-131m	R <sub>7</sub>	1,2·10 <sup>-9</sup>
	R <sub>24</sub>	2,88·10 <sup>-7</sup>
Xe-133	R <sub>24</sub>	2,7·10 <sup>-7</sup>

Als Eingangsdaten für das Rechenprogramm wurde die Tabelle B1 aus RP 65 in seiner korrigierten Version verwendet. Die Daten wurden als Excel Tabellenblatt aufbereitet und mit der Datenzusammenstellung, die für die Berechnungen in /HPA 11/ verwendet wurde /JON 13/, abgeglichen. So konnten Übertragungsfehler (das offiziell verfügbare RP 65 PDF-Dokument Dokument<sup>7</sup> ist ein Scan des ursprünglich verfügbaren Aus-

<sup>7</sup> [http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation\\_protection/doc/publication/065.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/065.pdf) (Link überprüft am 18.08.2014)

drucks, der insbesondere bei den Tabellenwerten schlecht lesbar ist) vom PDF in eine Excel-Datei ausgeschlossen werden.

Für die Verifikation der Berechnungsmethode wurde die (Excel-Tabellenblatt-Version) der Tabelle B1 aus RP 65 als Datenbasis verwendet und die berechneten Werte mit den in RP 65 veröffentlichten ungerundeten Werten verglichen.

Lediglich bei vier (von insgesamt fast 600) berechneten Werten gibt es Abweichungen von mehr als 10 % vom veröffentlichten Wert in RP 65, wie in Tab. 3.2 dokumentiert. Dabei ergeben sich die Abweichungen für Te-125m und I-131 durch die Anpassung der R-Werte nach /HPA 11/, wie in Tab. 3.1 dokumentiert. Die Abweichung bei Ce-139 wurde ebenfalls in /HPA 11/ aufgeführt und auf einen Fehler in der Berechnung für RP 65 zurückgeführt (der *Shielding Factor* wurde dort beim Pfad B1.2 nicht berücksichtigt). Somit bleibt lediglich die Abweichung bei Ar-37, für die keine Erklärung gefunden werden konnte. Da sich bei der Rundung der Werte aber keine Abweichung zwischen dem in RP 65 veröffentlichten und dem neu berechneten Wert ergeben, wurde keine weitere Ursachenforschung betrieben.

**Tab. 3.2** Abweichungen größer 10 % zwischen den in RP 65 veröffentlichten und den neu berechneten Freigrenzen

Nuklid	Aktivitätskonzentration oder Aktivität	RP 65	Berechnet	Verhältnis Berechnet / RP 65
Ar-37	Aktivität	$1,18 \cdot 10^8$ Bq	$1,84 \cdot 10^8$ Bq	1,56
Te-125m	Konzentration	$1,46 \cdot 10^3$ Bq/g	$4,66 \cdot 10^2$ Bq/g	0,32
I-131	Konzentration	$5,38 \cdot 10^1$ Bq/g	$4,36 \cdot 10^1$ Bq/g	0,81
Ce-139	Aktivität	$1,11 \cdot 10^6$ Bq	$5,26 \cdot 10^6$ Bq	4,74

Bei einigen Pfaden / Nukliden konnten durch die Verifikationsrechnungen Unklarheiten in der Dokumentation der Berechnungsmethode in RP 65 beseitigt werden, andere Fragen, die sich bei der Entwicklung des Programms stellten, blieben unbeantwortet. Die Klarstellungen und weiterhin bestehenden offenen Fragen werden im folgenden Unterkapitel 3.1 erläutert. Erkenntnisse zu den nuklidabhängigen Parametern werden in Unterkapitel 3.2 vorgestellt.

Eine komplette Gegenüberstellung der berechneten zu den in RP 65 dokumentierten ungerundeten Freigrenzen befindet sich im Anhang.

### **3.1 Erkenntnisse aus den Verifikationsrechnungen**

#### **3.1.1 Berücksichtigung der physikalischen Form**

Die bei den Eingangswerten tabellierte physikalische Form für jedes Nuklid muss bei der Berechnung der Aktivitäts-Freigrenzen zwingend berücksichtigt werden, da sonst unter Umständen bedeutend (bis zu 3 Größenordnungen) kleinere Freigrenzen berechnet würden. Dies geschieht hauptsächlich, wenn ein Nuklid laut Eingangstabelle nicht gasförmig vorliegt, man bei der Berechnung der Freigrenze aber die Gasform zulässt.

Da die Erhebung der möglichen physikalischen Erscheinungsformen der einzelnen Nuklide nicht mehr nachvollziehbar ist, (Zitat RP 65: „About 300 radionuclides were considered in this study. Their possible uses and their related physical forms were reviewed in consultation with European experts involved in advising small-scale users of radioactivity materials.“) sollten nach Ansicht des Forschungsnehmers die damals angenommenen physikalischen Erscheinungsformen zusammen mit den publizierten Freigrenzen aufgeführt werden. Sollten Nuklide inzwischen auch in anderen physikalischen Erscheinungsformen als denen, mittels derer die Freigrenzen berechnet wurden, vorliegen, ist eventuell eine Neuberechnung der Freigrenzen notwendig.

#### **3.1.2 Sonderfall Rn-222+**

Für normale Gase wird angenommen, dass diese in einer Gasflasche vorliegen. Der Pfad A1.3 trägt zur effektiven Dosis bei, der Pfad A1.2 hingegen nicht.

Bei Rn-222+ wird angenommen, dass das Nuklid nicht in einer Gasflasche vorliegt und auch nicht als Punktquelle verwendet wird. Die Pfade A1.1, A1.3 sowie B1.2 tragen somit nicht zur jeweiligen Dosis bei. Stattdessen wird angenommen, dass Radon in einem wie für Pfad A1.2 beschriebenen Vorrat an Ausgangsmaterialien (ungewollt) vorkommt. Pfad A1.2 trägt somit zur effektiven Dosis bei.

Würde Pfad B1.2 berücksichtigt, läge die Freigrenze für Aktivitäten 5 Größenordnungen niedriger.

### 3.1.3 Pfad A1.4

*Inhalation of Dust or Volatiles*: Hier bleibt unklar, welche physikalischen Formen überhaupt zu "Dust" (Übersetzung: Staub/Staubteilchen) in der Luft führen können, bzw. ob „*volatiles*“ nur die flüchtigen Bestandteile von Flüssigkeiten sind.

Die Berechnungen zeigen, dass auch für ausschließlich gasförmig vorliegende Nuklide dieser Pfad als möglicher Expositionspfad angenommen wurde.

### 3.1.4 Pfad A1.5

Liegt ein Nuklid ausschließlich gasförmig vor, ist der für den Pfad A1.5 maßgebliche R-Wert ( $R_9$ ) Null oder nicht definiert, wodurch es keinen Beitrag dieses Pfades zur effektiven Dosis des Arbeiters durch Ingestion gibt. Liegt das Nuklid in mehreren physikalischen Formen vor, ist der Wert  $R_9$  meist ungleich Null. Ob der Pfad A1.5 für das gasförmig vorliegende Nuklid berücksichtigt wird, oder nicht, macht im Endergebnis nichts aus, da der Pfad A1.4 in der Regel einen um Größenordnungen größeren Beitrag zur Dosis leistet.

Die nuklidspezifischen Parameter  $R_9$  und  $R_{10}$  liegen zudem meist in derselben Größenordnung. Werden die Zahlenwerte für Nuklidkonzentration, Inhalation, Staubkonzentration, Expositionsdauer (Pfad A1.4) bzw. Nuklidkonzentration und Ingestionsmenge (Pfad A1.5) eingesetzt, ergibt sich für die Effektivdosen:

$$E(\text{Pfad A1.4}) = 0,08 \text{ Bq/a} \cdot R_{10}$$

$$E(\text{Pfad A1.5}) = 0,003 \text{ Bq/a} \cdot R_9$$

Bei den gegebenen Nukliden macht der Pfad A1.5 maximal ein Viertel des Beitrags durch Pfad A.4 an der Effektivdosis aus (Co-62m, bei dem aber die Externe Exposition entscheidend für die Konzentrations-Freigrenze ist).

### 3.1.5 Pfad B1.2 Externe Exposition durch Handhabung einer Quelle

In der Beschreibung des Szenarios heißt es unter a), dass dieser Pfad auch bei Edelgasen mit einer Halbwertszeit über 24 Stunden anzunehmen sei. Es stellt sich die Fra-



ge, wie mit anderen gasförmig vorliegenden Nukliden zu verfahren ist, die ebenfalls eine Lebensdauer über 24 Stunden haben, die keine Edelgase sind.

Zudem stellt sich die Frage, ob dieser Pfad nicht auch für nicht-dispergierbare Feststoffe relevant ist. Bisher werden für Feststoffe keine Parameter für die Masse, Dichte, halbe Dicke der Quelle aufgeführt, weswegen keine Berechnung dieses Pfades für Feststoffe möglich ist.

### **3.1.6 Pfad B1.2, Ar-37**

Der berechnete Wert weicht um den Faktor 1,6 vom publizierten RP 65-Wert ab. Auf die gerundete Freigrenze hat diese Abweichung keinen Einfluss.

### **3.1.7 Pfad B1.2, Ce-139**

Wie bereits in /HPA 11/ angemerkt, wurde bei dem in RP 65 publizierten Wert der Shielding-Factor bei Ce-139 nicht berücksichtigt. Die publizierte Freigrenze ist dadurch um ca. einen Faktor 5 niedriger im Vergleich zu dem Wert, der sich mit der Berücksichtigung des Shielding-Factors ergibt.

### **3.1.8 Pfad B3.2 Inhalation von Staub auf einer Deponie**

In /EC 93/ werden zwei verschiedene Möglichkeiten angegeben, wie es zu einer Inhalation von radioaktiven Stoffen von einer Deponie kommen kann. **Fall 1:** Eine Einzelperson der Bevölkerung inhaliert unfallbedingt beim Aufenthalt auf einer Deponie Staub von einer unverdünnten radioaktiven Quelle mit einer Masse von 1 g über einen Zeitraum von  $1 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ . **Fall 2:** In diesem Szenario wird angenommen, dass sich eine Einzelperson der Bevölkerung über einen Zeitraum von  $5000 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$  in der Nähe einer Deponie aufhält und Staub eingeatmet wird, wobei die radioaktive Quelle auf 100 kg des Bodens verteilt ist.

Obwohl prinzipiell beide Fälle in Kombination vorkommen können (eine Person lebt neben der Deponie und hält sich gelegentlich auf dieser Deponie auf, wobei es zu Fall 2 kommen könnte), wird nur einer dieser Fälle berücksichtigt. Welcher der beiden ist dabei egal, da beide die gleichen Zahlenwerte liefern.

Vergleichsrechnungen zeigen, dass bei den Nukliden, für deren Freigrenze der Pfad 3.2 eine entscheidende Rolle spielt, Abweichungen von bis zu 90 % von den ungerundeten Freigrenzen aus RP 65 auftreten, wenn beide Fälle des Pfades berücksichtigt werden (siehe Tab. 3.3).

**Tab. 3.3** Abweichungen bei den berechneten Freigrenzen für Aktivitäten bei Nukliden, für die der Pfad B3.2 entscheidend ist.

In RP 65 wurde nur einer der beiden vorgestellten Fälle angenommen, wodurch sich Abweichungen von bis zu 90 % von dem Wert ergeben, der mit der Berücksichtigung beider Fälle berechnet wurde.

Nuklid	Berechnete Aktivitäts-Freigrenze [Bq]		Relative Abweichung [%]
	B3.2 beide Fälle	B3.2 nur ein Fall	
Am-241	$5,08 \cdot 10^3$	$7,87 \cdot 10^3$	55
Cf-252	$1,05 \cdot 10^4$	$1,79 \cdot 10^4$	70
Cm-244	$8,93 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^4$	56
Pu-238	$5,71 \cdot 10^3$	$8,85 \cdot 10^3$	55
Pu-239	$5,21 \cdot 10^3$	$8,06 \cdot 10^3$	55
Th-228+	$5,00 \cdot 10^3$	$8,76 \cdot 10^3$	75
Th-230	$7,30 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^4$	59
Th-232N	$1,25 \cdot 10^3$	$1,55 \cdot 10^3$	24
U-234	$1,35 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^4$	90
U-238+	$1,51 \cdot 10^4$	$2,84 \cdot 10^4$	88

### 3.2 Aktualisierung der R-Werte

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, sind bei den Berechnungen der Szenarien verschiedene nuklidabhängige Parameter, sogenannte R-Werte, wichtige Eingangsparameter für die Berechnung. (

Tab. 3.4 zeigt eine Übersicht, welches Szenario von welchem/welchen nuklidabhängigen Parameter/n abhängt.)

Die Zusammenstellung dieser Eingangsparameter für die RP 65 Veröffentlichung wurde Anfang der 1990er Jahre erstellt. Dabei wurde auf Daten und Veröffentlichungen hauptsächlich aus den 1980er Jahren zurückgegriffen (vergleiche Tab. 2.3), die teilweise inzwischen überholt sind. Die R-Werte sind zudem nicht für alle Radionuklide verfügbar und begrenzen dadurch die Anzahl der berechenbaren Freigrenzen. Ziel der ursprünglich geplanten Software-Entwicklung war es daher, nicht nur die Berechnungsmethode aus RP 65 nachzubilden, sondern auch die nuklidabhängigen Werte zu aktualisieren. Erkenntnisse zur angestrebten Aktualisierung der nuklidabhängigen Parameter werden im Folgenden vorgestellt.

Mobbs und Harvey /MOB 99/ haben für weitere ca. 400 Nuklide Freigrenzen nach der Methode von RP 65 berechnet. Leider ist auch hier die Dokumentation des Rechenweges und der Eingangsparameter sehr kompakt und es wird nicht klar, woher die nuklidabhängigen Parameter bezogen bzw. wie genau sie neu berechnet wurden. Lediglich die Herkunft der Dosisparameter für Inhalation und Ingestion wird explizit erwähnt (/ICRP 94/ und /ICRP 96/). Zusätzlich wird dort auch nicht erwähnt, welche physikalischen Erscheinungsformen bei der Berechnung der neuen Freigrenzen angenommen wurden. Die dort erzielten Ergebnisse sind deshalb leider nicht nachvollziehbar und wegen fehlender, in der Publikation nicht veröffentlichter Eingangsparameter, nicht nachrechenbar.

### **3.2.1 R1: Mittlere Energie je Gamma-Zerfall**

### **R2: Mittlere Energie je Beta-Zerfall**

### **Halbwertszeit zur Ableitung von DECAY**

Die mittleren Energien der Gammastrahlung beziehungsweise der Betastrahlung pro Zerfall in MeV wurde in RP 65 von /ICRP 83/ übernommen. Eine Referenz für die Halbwertszeiten, die nötig ist, um den bei fast allen *Disposal* Szenarien verwendeten Parameter *DECAY* zu bestimmen, wird in RP 65 nicht angegeben. Vermutlich wurde dabei auch /ICRP 83/ verwendet (die im vorherigen Unterkapitel 3.1 angesprochenen Verifikationsrechnungen wurden mit den Halbwertszeiten aus dieser Datenquelle ausgeführt).

Inzwischen hat die Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP) einen neuen Datensatz mit Kern-Zerfallsdaten herausgegeben /ICRP 08/. Die Parameter R1, R2 und Halbwertszeit lassen sich leicht mit den dort verfügbaren Daten aktualisieren.

**Tab. 3.4** Übersicht über die verwendeten nuklidabhängigen Parameter in den einzelnen Szenarien. Grün hinterlegt sind die leicht zu aktualisierenden Parameter

Freigrenzen		Nuklidabhängige Parameter										
		R1	R2	R5&R6	R7	R8	R9	R10	R19	R20	R24	VS
<b>Aktivitätskonzentration, Szenario</b>												
Normal Use (Workplace)	A11				X						X	
	A12	X	X									
	A13	X										
	A14							X				
	A15						X					
Disposal (public)	A31	X										X
	A32							X				
	A33						X					X
<b>Aktivität, Szenario</b>												
Normal Use (Workplace)	B11								X	X		
	B12				X						X	
Accidental (workplace) Spillage	B21				X	X						
	B22				X	X						
	B23			X								
	B24						X					
	B25							X				
B26	X	X									X	
Accidental (workplace) Fire	B27				X	X						
	B28							X				
	B29	X	X									
Disposal (public)	B31	X										X
	B32							X				X
	B33				X					X		X
	B34						X					X

### 3.2.2 R5 & R6: Gamma & Beta Dosis infinite Ebene

Die effektive Dosis pro Zeit über einer infiniten (gleichmäßig mit Radionukliden belegten) Ebene wurde in RP 65 aus /KOC 83/ übernommen. Neuere Datenbasen für diesen Parameter konnten nicht identifiziert werden.

Die in /KOC 83/ vorgestellte Berechnungsmethode des Parameters R5 & R6 konnte zudem nicht nachvollzogen werden, da wichtige Eingangsparameter für diese Berech-

nungen ( $G_{\gamma}^k$ : „ratio of dose rate in the  $k$ th organ to the air kerma for photons of energy  $E_{\gamma}$ “) der dort verwendeten Referenz /ECK 80/ nicht (mehr) auffindbar ist.

Eine Aktualisierung des R-Wertes R5&R6 ist mit diesem Kenntnisstand derzeit nicht möglich.

### **3.2.3 R7: Gamma-Hautdosis in 70 $\mu$ m Hauttiefe**

Die Dosisfaktoren für die Gamma-Hautdosis in 70 $\mu$ m Hauttiefe in RP 65 wurden /CHP 88/ entnommen. Diese Referenz ist nur noch auf Französisch auffindbar. Die Berechnungsmethode konnte daher bisher nicht mit vertretbarem Aufwand nachvollzogen werden. Neuere Datenbasen für diesen Parameter konnten nicht identifiziert werden.

Anzumerken ist zudem, dass bei den Szenarien A1.1, B1.2 und indirekt in B3.3 darauf hingewiesen wird, dass der verwendete Parameter R7 nur aus Mangel an besser zum Szenario passenden Daten<sup>8</sup> verwendet wurde (die Dicke der zu betrachtenden Hautschicht an den interessierenden Körperstellen wird in der Szenario-Beschreibung mit 400 $\mu$ m angesetzt).

Eine Aktualisierung des R-Wertes R7 ist mit dem derzeitigen erreichten Kenntnisstand nicht möglich.

### **3.2.4 R8: Beta Hautdosis in 40 $\mu$ m Hauttiefe**

#### **R24: Beta Hautdosis in 400 $\mu$ m Hauttiefe**

Die Dosisfaktoren für die Beta Hautdosis in RP 65 sind /KOC 87/ entnommen. In dieser Literatur werden die dort mit „Dose Rate Conversion Factors“ (DRCF) bezeichneten R-Werte für die externe Exposition der Haut durch Betastrahler, die gleichförmig auf der Körperoberfläche verteilt sind, vorgestellt. Die Berechnungsmethode für diese Faktoren fußt auf sogenannten „electron scaled point kernels“ nach Berger (/BER 71/, /BER 73/, /BER 74/), die ein Maß für die Energieabsorption innerhalb eines Mediums im Abhängigkeit vom Abstand von einem punktförmigen, monoenergetischen Elektronenstrahler sind. Die „point kernels“ werden in /BER 73/ für Energien zwischen 0,005 und 10 MeV

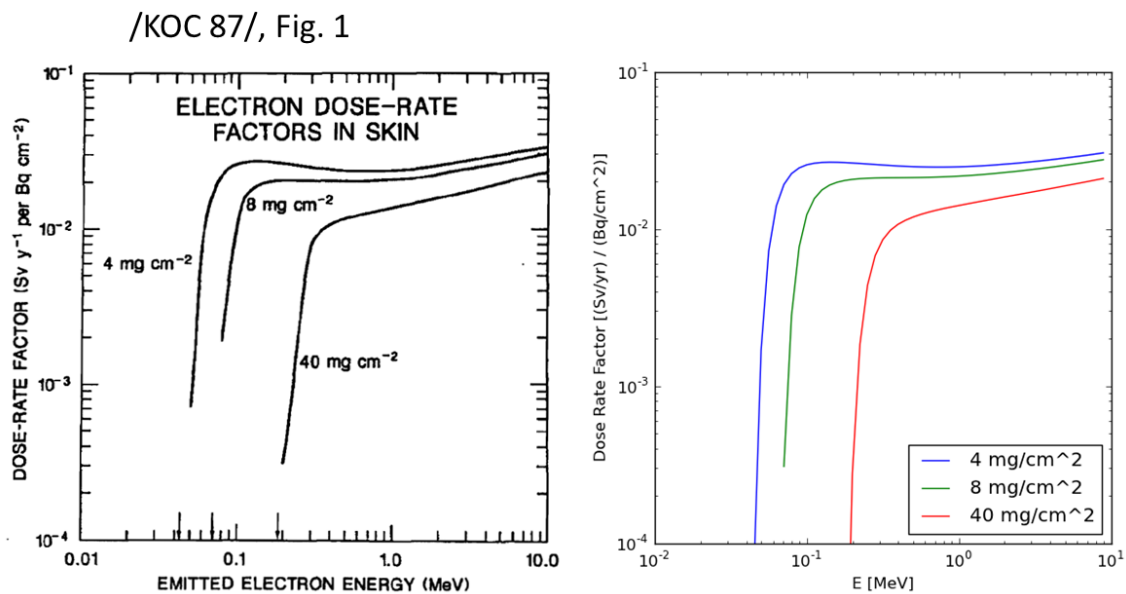
---

<sup>8</sup> RP 65: „since no other data were available“

in tabellarischer Form für Abstände zwischen 0 und  $1,2 r_0$  angegeben. Dabei bezeichnet  $r_0$  die „continuous slowing down approximation“ (CSDA)-Reichweite eines Elektrons mit der Energie  $E_0$  (siehe Kapitel 3.2.2 in /GRS 14/).

In /KOC 87/ wird zunächst die nötige räumliche Integration vorgenommen, um die „point kernels“ einer Punktquelle aus /BER 73/ auf eine gleichförmige Flächenquelle und einen vorgegebenen Abstand von dieser Flächenquelle umzurechnen und so „dose rate factors“ zu erhalten. In einem zweiten Schritt wird dann die Faltung mit dem Energiespektrum der Betastrahlung für verschiedene Nuklide vorgenommen um final die DRCFs für verschiedene Nuklide und verschiedene Hauttiefen (40  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  und 400  $\mu\text{m}$ ) zu berechnen.

Die Berechnung der „dose rate factors“ konnte nachvollzogen werden und wurde in einem Python Programm umgesetzt. Dabei wurde für die Interpolation der CSDA nach /GRS 14/ vorgegangen und eine logarithmische Interpolation bei den Beta-Energien durchgeführt. In Abb. 3.1 ist eine Visualisierung der nachgerechneten Faktoren der entsprechenden Abbildung in /KOC 87/ gegenübergestellt. Die Graphen zeigen eine gute Übereinstimmung.



**Abb. 3.1** Visualisierung von „Dose Rate Factors“ über der Elektronenenergie aus /KOC 87/ (links) sowie die Visualisierung eigener Berechnungen (rechts)

Um aus den „dose rate factors“ die R-Werte  $R_8$  und  $R_{24}$  für einzelne Nuklide zu bestimmen, müssen diese entsprechend den Gleichungen (6) und (7) aus /KOC 87/ mit

den diskreten und / oder kontinuierlichen Beta-Energiespektren der Nuklide kombiniert werden. Eine aktuelle Zusammenstellung der Beta-Energiespektren der Nuklide ist in /ICRP 08/ zu finden.

Eine Aktualisierung von  $R_8$  und  $R_{24}$  sowie eine Erweiterung der Datenbasis für beliebige Nuklide aus /ICRP 08/ mit der Methode von /KOC 87/ auf Grundlage der „point kernels“ von /BER 73/ ist damit prinzipiell möglich. Es wäre dann gegebenenfalls aber zu recherchieren, ob die Methode und insbesondere die „point kernel“ Eingangsparameter noch dem Stand von W&T entsprechen.

### **3.2.5 R9: Ingestionsdosis pro Einheits-Aufnahme R10: Inhalationsdosis pro Einheits-Aufnahme**

Die maximale Ingestionsdosis bzw. Inhalationsdosis pro Einheitsaufnahme („Dose per Unit Intake“: DPUI) wurde in RP 65 hauptsächlich aus /ICRP 82/ und in Ausnahmefällen von /PHI 91/ übernommen. Mittels der neueren ICRP-Publikation zu Dosiskoeffizienten bei Inkorporation von Radionukliden von Arbeitern /ICRP 94/ können diese R-Werte aktualisiert werden.

### **3.2.6 R19: Dosis durch eine Gamma-Punktquelle R20: Dosis durch eine Beta-Punktquelle**

Die Dosis durch eine Gamma-Punktquelle bzw. Beta-Punktquelle in 1 m Entfernung wurde in RP 65 von /ASS 91/ übernommen. Diese Referenz ist nur auf Französisch Verfügbar und konnte nicht mit vertretbarem Aufwand nachvollzogen werden.

Die Beschreibung der R-Werte (bei den Szenarien, bei denen sie verwendet werden) stimmt mit der Definition der Dosisleistungskoeffizienten (DLK)  $\dot{e}$ , wie sie für die Berechnung der  $Q_A$  bzw.  $Q_B$  Werte verwendet werden, überein. Auch die verwendeten Einheiten sind identisch.

Ein Vergleich mit den in /IAEA 08/ bzw. dessen Nachfolger /IAEA 12a/, Anhang 2, Tabelle II.2 veröffentlichten Werten zeigt, dass im Falle von R19 eine gute Übereinstimmung mit den DLK  $\dot{e}_{pt}$  besteht. Größere Abweichungen zeigen sich hauptsächlich bei Werten, für die auch in /GRS 14/, Anhang F große Abweichungen (mehrere Größenordnungen) zwischen den im Rahmen dieses Vorhabens neu berechneten DLK und



den von der IAEA (falsch) publizierten Werten besteht. Eine Erklärung dieser Abweichungen wird in /GRS 14/ gegeben. Prinzipiell kann R19 also mit den nach /GRS 14/ neu berechneten DLK  $\dot{e}_{pt}$  aktualisiert werden.

Beim Vergleich von R20 mit den DLK  $\dot{e}_{\beta}$  zeigt sich ein anderes Bild. Trotz übereinstimmender Definition und Einheit ist der R-Wert fast immer deutlich kleiner (bis zu 6 Größenordnungen bzw. auch ein R-Wert 0 bei einem DLK im Bereich von  $10^{-15}$  Sv/(Bq·h)) als der DLK. Der Grund für diese Abweichung ist unklar. Von einer Aktualisierung von R20 mit den neu berechneten  $\dot{e}_{\beta}$  nach /GRS 14/ sollte deshalb zunächst abgesehen werden und die Originalliteratur /ASS 91/ überprüft werden.

### **3.2.7 Volatilität S35 von Flüssigkeiten**

Die in RP 65 angegebene Referenz /KLE 90/ konnte nicht aufgefunden werden. Die Grundlage dieser Zahlenwerte bleibt so unklar und eine Aktualisierung des Parameters insbesondere aber auch die Bestimmung des Parameters für bisher nicht aufgelistete Nuklide, ist mit diesem Kenntnisstand nicht möglich.

## **4 Programmbeschreibung BerFG**

Das Programm *BerFG* zur Berechnung der Freigrenzen basiert auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2010 und ist in Excel-VBA-Code geschrieben. Das Programm besteht aus mehreren Modulen. Es wurde mit Office 2010 bzw. Excel 2010 in einer Windows 7-Umgebung (32 Bit) getestet.

### **4.1 Installation**

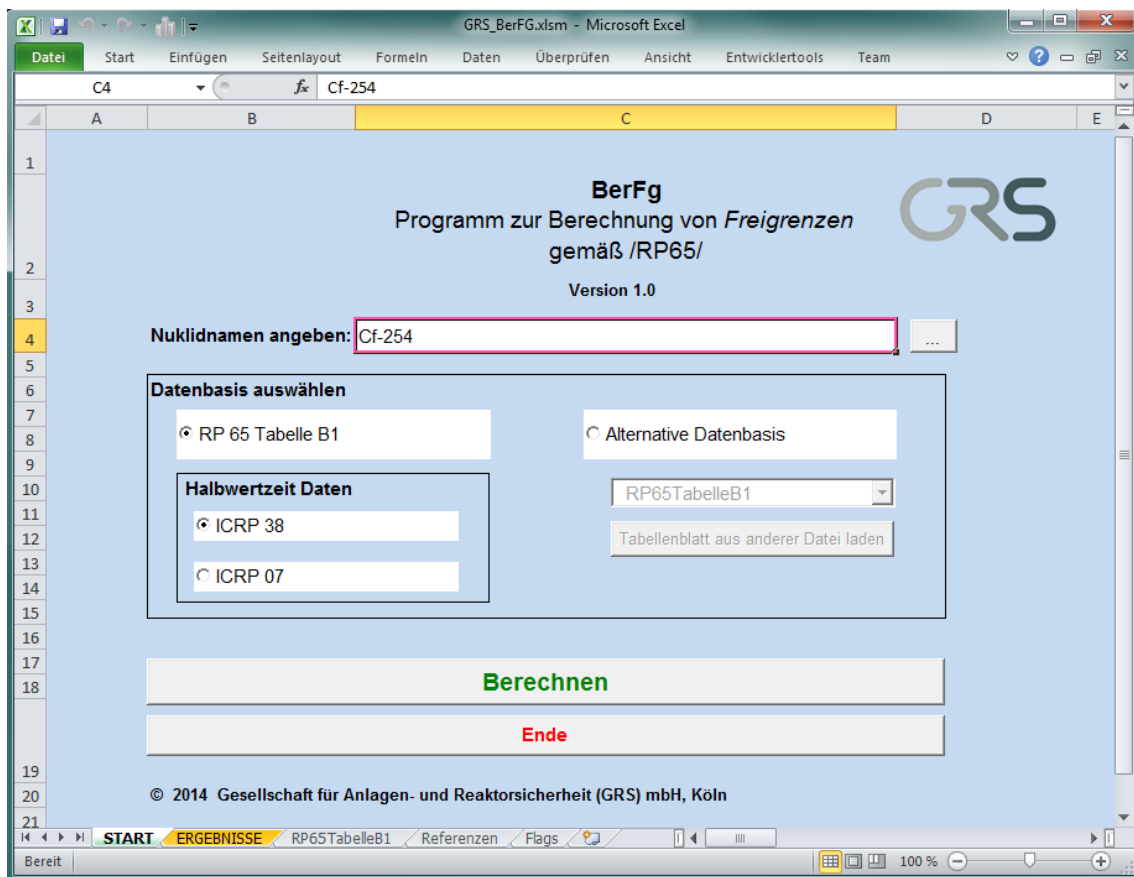
Das Programm (die Datei *GRS\_BerFG.xlsm*) kann an eine beliebige Stelle im lokalen Dateiverzeichnis auf einer Festplatte kopiert werden. Der Start von einem Netzlaufwerk kann Probleme verursachen, daher wird von dieser Möglichkeit abgeraten. Der Anwender muss für einen korrekten Rechenlauf volle Schreib- und Leserechte für diese Verzeichnisse – einschließlich des Hauptverzeichnisses, in dem das Programm liegt – besitzen.

### **4.2 Programmstart**

Das Programm wird durch Aufruf der Hauptdatei *GRS\_BerFG.xlsm* gestartet. Nach dem Programmstart erscheint das Hauptfenster (Reiter „START“, Abb. 4.1). Hier werden alle Parameter für die Berechnung der Freigrenzen eingestellt und die Berechnung gestartet.

Mit dem Öffnen der Datei *GRS\_BerFG.xlsm* wird im Programmverzeichnis eine Log-Datei für das Gesamt-Programm angelegt (*GRS\_BerFG.log*). Hier werden die Einstellungen und Eingaben der Startseite dokumentiert. Insbesondere wird hier vermerkt, wenn Nuklide nicht in der ausgewählten Datenbasis gefunden wurden und somit keine Berechnung der Freigrenzen mit den gewählten Einstellungen möglich ist.

Da das Programm Makros enthält, kann es je nach den Sicherheitseinstellungen von Office auf dem jeweiligen System zu einer Abfrage kommen. Hier müssen für einen korrekten Programmablauf aktive Inhalte aktiviert werden (Schaltfläche „Inhalt aktivieren“ drücken).



**Abb. 4.1** Startansicht des Programms GRS\_BerFG.xlsm.

### 4.3 Durchführen einer Rechnung

Um eine Freigrenze mit dem Programm BerFG zu berechnen, müssen zunächst ein oder mehrere Nuklidnamen angegeben werden (siehe Kapitel 4.3.1) und, falls gewünscht, eine von den Standardeinstellungen (siehe Kapitel 4.3.2) abweichende Datenbasis ausgewählt werden (siehe Kapitel 4.3.3). Durch Klicken auf die Schaltfläche „Berechnen“ wird die Rechnung gestartet und eine Kurzübersicht über die Ergebnisse im Tabellenblatt „ERGEBNISSE“ dokumentiert. Nach Ende der Berechnung wird automatisch das Tabellenblatt „ERGEBNISSE“ aktiviert. Sollte keine Berechnung möglich gewesen sein, da der Nuklidname nicht in der gewählten Datenbasis zu finden war, wird stattdessen das Tabellenblatt der Datenbasis aktiviert. Sollen weitere Rechnungen durchgeführt werden, muss lediglich das Tabellenblatt „START“ ausgewählt und die oben benannten Schritte wiederholt werden.

#### **4.3.1 Auswahl des/der Nuklidnamen**

Um die Freigrenze eines Nuklids zu berechnen, muss dem Programm zunächst der Nuklidname (bzw. mehrere Nuklidnamen durch Semikolon getrennt) angegeben werden. Der Name kann entweder direkt in die entsprechende Zelle des START-Tabellenblattes eingegeben werden oder es kann über die Schaltfläche „...“ neben dem Eingabefeld die Auswahl von Nuklidnamen aus einem Excel-Tabellenblatt aktiviert werden.

Wird diese zweite Variante verwendet, erscheint eine kleine Message-Box, die zur Eingabe eines Zellbereiches auffordert. Dieser Zellbereich kann entweder direkt in diese Message-Box eingetippt werden (wobei die Excel-konforme Schreibweise verwendet werden muss), oder es kann zu einem beliebigen Excel-Tabellenblatt einer bereits geöffneten Excel-Datei navigiert werden und dort der Zellbereich mit der Maus ausgewählt werden. Die Auswahl wird mit „OK“ in der Message-Box bestätigt. Durch Anklicken von „Abbrechen“ wird die Message-Box geschlossen, ohne dass ein Zellbereich mit Nukliden ausgewählt wurde. Wurde ein Zellbereich ausgewählt und mit „OK“ bestätigt, dann erscheint der bzw. erscheinen die Nuklidnamen aus den ausgewählten Zellen im START-Tabellenblatt in der Eingabezelle für die Nuklidnamen.

Die Schreibweise der Nuklidnamen richtet sich nach der Schreibweise der Nuklide, wie sie in der Tabelle für die nuklidabhängigen Parameter (standardmäßig ist das Tabellenblatt „RP65TabelleB1“) verwendet wird.

#### **4.3.2 Standard Datenbasis**

Standardmäßig dient die Tabelle B1 aus RP 65, korrigiert nach /HPA 11/ und ergänzt um die Halbwertszeiten nach /ICRP 94/ und /ICRP 08/ als Datenbasis für die nuklidabhängigen Parameter, die für die Berechnung der Freigrenzen benötigt werden. Auf dem „START“ Tabellenblatt ist die Checkbox „RP 65 Tabelle B1“ aktiviert. Eine weitere Standardeinstellung ist, dass zusammen mit „RP 65 Tabelle B1“ die Halbwertszeit nach /ICRP 94/ verwendet wird (die Checkbox „ICRP 38“ ist aktiviert). Sollen aktuellere Halbwertszeiten nach /ICRP 08/ verwendet werden, muss die Checkbox „ICRP 07“ aktiviert werden.

Die mit der Standardeinstellung ausgewählten nuklidabhängigen Parameter sind im geschützten<sup>9</sup> Tabellenblatt „RP65TabelleB1“ hinterlegt. Weitere Informationen zu diesen Daten sind in den Tabellenblättern „Referenzen“ und „Flags“ hinterlegt.

#### 4.3.3 Alternative Datenbasis

Wahlweise können alternative Zusammenstellungen der nuklidabhängigen Daten für die Berechnung der Freigrenzen verwendet werden. Diese müssen als Excel-Tabellenblatt vorliegen und den nachfolgend beschriebenen Formatangaben entsprechen:

- Es gibt eine einzelne Headerzeile in der **folgende Schlüsselwörter** die einzelnen Spalten der jeweils angegebenen Bedeutung (siehe RP 65) markieren:
  - **Nuclide:** Name des Nuklides
  - **Waste Form:** Erscheinungsform des Abfalls (gas vapour, liquid, solid, solid massive, capsule, foil)
  - **R1:** Mean gamma Energy per disintegration [MeV]
  - **R2:** Mean beta Energy per disintegration [MeV]
  - **R5 & R6:** Gamma & beta semi-infinite plane [(Sv/h)/(Bq/m<sup>2</sup>)]
  - **R7:** Gamma skin dose 7mg/cm<sup>2</sup> [(Sv/h)/(Bq/cm<sup>2</sup>)]
  - **R8:** Beta skin dose 4 mg/cm<sup>2</sup> [(Sv/h)/(Bq/cm<sup>2</sup>)]
  - **R9:** Ingestion dose per unit intake [(max) Sv/Bq]
  - **R10:** Inhalation dose per unit intake [(max) Sv/Bq]
  - **R19:** Point source gamma [(Sv/h)/Bq]

---

<sup>9</sup> Die Werte dieses Tabellenblattes wurden sorgfältig überprüft und sollten nicht leichtfertig geändert werden. Für Sensitivitätsstudien zu den einzelnen Parametern sollte nicht dieses Tabellenblatt geändert werden. Vielmehr bietet sich für solche Untersuchungen die Verwendung einer alternativen Datenbasis an.

Sollte sich trotz aller Sorgfalt herausstellen, dass einzelne Werte der Tabelle „RP65TabelleB1“ falsch sind, dann kann der Blattschutz mit dem Passwort „RP65B1“ aufgehoben und die Werte korrigiert werden.

- **R20:** Point source beta [(Sv/h)/Bq]
  - **R24:** Beta skin dose 40 mg/cm<sup>2</sup> [(Sv/h)/(Bq/cm<sup>2</sup>)]
  - **VS35:** Volatility S-35 of liquids [Fraction of inventory]
  - **HL:** Half life [hours]
- Die Spalte R1 muss vor den Spalten R10 und R19 positioniert sein
  - Die Spalte R2 muss vor den Spalten R20 und R24 positioniert sein

In den Spalten werden dann für jedes interessierende Nuklid die Zahlenwerte für die einzelnen Parameter angegeben. Vom Programm dabei keine Überprüfung der Einheiten und insbesondere keine Umrechnung in die gewünschte Einheit vorgenommen. Der Anwender muss also selbst sicherstellen, dass die nuklidabhängigen Parameter in den richtigen Einheiten vorliegen.

Um eine vorbereitete Datenzusammenstellung im Programm *BerFG* verwenden zu können, muss das entsprechende Datenblatt gegebenenfalls erst in das Programm geladen und dann ausgewählt werden. Zunächst muss dafür die Checkbox „Alternative Datenbasis“ aktiviert werden. Die darunter befindliche Drop-Down-Liste kann jetzt aufgeklappt werden und ein bereits in der Excel-Datei *GRS\_BerFG.xlsx* vorhandenes Tabellenblatt ausgewählt werden.

Ist die gewünschte Excel-Tabelle noch nicht in der Datei *GRS\_BerFG.xlsx* sondern in einer anderen Excel-Datei vorhanden, dann kann eine Kopie des gewünschten Tabellenblattes über den Schalter „Tabellenblatt aus anderer Datei laden“ im Programm *BerFG* erzeugt und diese Datenbasis verwendet werden. Dazu muss der Schalter „Tabellenblatt aus anderer Datei laden“ gedrückt werden und es erscheint die Bedienoberfläche „Alternative Datenquelle auswählen“ (siehe Abb. 4.2). In dieser Bedienoberfläche muss zunächst die Ursprungs-Excel-Datei über die Ordner-Schaltfläche ausgewählt werden. Nach der Auswahl der Datei muss in der Drop-Down-Liste „Tabellenblatt“ das gewünschte Tabellenblatt ausgewählt werden, in dem die alternativen nuklidabhängigen Parameter zusammengestellt sind. Schließlich muss die Kopie des Tabellenblattes in der Datei *GRS\_BerFG.xlsx* noch einen Namen zugewiesen bekommen und der Speicherort in der Excel-Datei festgelegt werden. Mit „Datei verwenden“

den“ wird die Kopie erstellt und zur Startansicht des Programms BerFG gewechselt. Das neu erstellte Tabellenblatt mit der Kopie der ausgewählten Daten ist aktiviert.

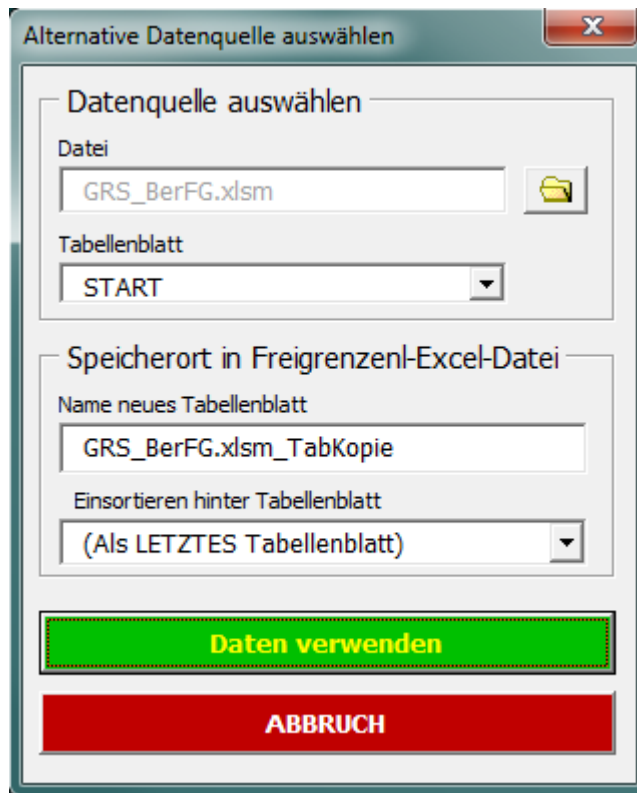


Abb. 4.2 Bedienoberfläche „Alternative Datenquelle auswählen“.

#### 4.4 Rechenergebnisse

##### 4.4.1 Kurzübersicht im Tabellenblatt „ERGEBNISSE“

Im Tabellenblatt „ERGEBNISSE“ wird eine Kurzübersicht über die Rechenergebnisse gegeben. Für jedes neu berechnete Nuklid wird eine neue Zeile direkt unter der Header-Zeile angelegt. In den einzelnen Spalten werden die folgenden Werte dokumentiert:

**Datenbasis** Name des Tabellenblattes, von dem die nuklidabhängigen Parameter bezogen wurden

**Nuklid** Name des Nuklids

### **Freigrenze spezifische Aktivität [Bq/Gramm]**

Berechnete ungerundete Freigrenze für die spezifische Aktivität

### **Szenario spezifische Aktivität**

Kurzbeschreibung des für die Freigrenze entscheidenden Szenarios sowie Informationen, wenn einzelne Pfade wegen fehlender nuklidabhängiger Parameter nicht berechnet werden konnten

### **Freigrenze Aktivität [Bq]**

Berechnete ungerundete Freigrenze für die Aktivität

### **Szenario Aktivität**

Kurzbeschreibung des für die Freigrenze entscheidenden Szenarios sowie Informationen, wenn einzelne Pfade wegen fehlender nuklidabhängiger Parameter nicht berechnet werden konnten

**Log Datei** Name und Link zur erstellten Log-Datei für die Berechnung der Freigrenze für dieses Nuklid (siehe folgendes Unterkapitel)

## **4.4.2 Ausführliche Dokumentation der Berechnung in LOG-Datei**

In den Log-Dateien, die für jedes Nuklid und die gewählte Datenbasis einzeln angelegt werden, wird der Rechenweg zur Bestimmung der Freigrenzen ausführlich dokumentiert. Dazu gehören die eingelesenen nuklidabhängigen Parameter sowie die Zwischenergebnisse für jeden einzelnen Pfad. Es werden auch die gerundeten Freigrenzen aufgeführt.

Der Name der Log-Datei setzt sich aus dem Namen des Tabellenblattes mit den nuklidabhängigen Parametern, dem Nuklidnamen, der Programmversion und eventuell der Datenbasis für die Halbwertszeiten zusammen. Die Datei wird im selben Verzeichnis angelegt, in dem sich auch das Programm `GRS_BerFG.xlsm` befindet. Sollte bereits eine Datei mit dem gleichen Namen bestehen, werden die Ergebnisse der neuen Berechnung an diese Datei angehängt. Bestehende Dateien werden also nicht überschrieben.



#### **4.5 Beenden des Programms**

Das Programm kann entweder über die Schaltfläche „Ende“ auf dem „START“-Tabellenblatt oder durch schließen der Excel-Datei beendet werden. Soll die Kurzdokumentation der neu berechneten Ergebnisse im Tabellenblatt „ERGEBNISSE“ behalten werden, müssen die Änderungen in der Datei gespeichert werden. Die vom Programm angelegten bzw. erweiterten Log-Dateien bleiben auch erhalten, wenn die Änderungen in der Excel-Datei GRS\_BerFG.xlsx nicht gespeichert werden.

## 5 Diskussion und Ausblick

Bei der Entwicklung des Programms zur Berechnung der Freigrenzen nach RP 65 traten zahlreiche Lücken in der Dokumentation auf. Generell gilt, dass die Berechnung der Freigrenzen nach RP 65 auf Grundlage von Szenarien erfolgt, deren Aussagekraft in Bezug auf reale Situation nicht weiter belegt wird und anhand der Dokumentation auch nicht (mehr) verifiziert werden kann. Kritisch zu sehen ist hier insbesondere die Einbeziehung verschiedenster als konstant angenommener Parameter, die ohne Quellenangabe in die Berechnungen eingehen und letztlich ausschlaggebend für die ermittelten Freigrenzen sind.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass bei der Berechnung der Aktivitätsfreigrenzen die physikalische Erscheinungsform der Nuklide einen entscheidenden Einfluss auf die berechneten Freigrenzen haben kann. Die Erhebung zu den möglichen Erscheinungsformen, die nicht weiter mit Referenzen belegt wird, liegt schon über 20 Jahre zurück. Es stellt sich die Frage, ob Nuklide inzwischen nicht auch in anderen als den damals üblichen Anwendungen verwendet werden. Die tabellarischen Zusammenstellungen der Freigrenzen sollte daher auch eine Spalte mit den bei der Berechnung verwendeten physikalischen Erscheinungsformen enthalten, um gegebenenfalls abschätzen zu können, ob die Werte auch für die interessierende physikalische Erscheinungsform relevant sind oder ob eine Neubetrachtung notwendig ist.

Dreh- und Angelpunkt bei der Berechnung der Freigrenzen sind neben den betrachteten Pfaden die nuklidabhängigen Parameter. Diese werden in tabellarischer Form in RP 65 für eine Vielzahl von Nukliden angegeben. Teilweise sind die Tabellenwerte inzwischen veraltet. Teilweise können die damals für die Parameter verwendeten Berechnungsmethoden nicht mehr nachvollzogen werden, da auf die angegebenen Referenzen (mit vertretbarem Aufwand) nicht mehr zugegriffen werden kann. Eine Erweiterung der Berechnungsmethode auf neue Nuklide gestaltet sich deshalb als schwierig und konnte im Rahmen dieses Projektes nicht erreicht werden. Das Berechnungsprogramm wurde deshalb aber dahingehend flexibel gestaltet, dass, sobald die nuklidabhängigen Parameter für „neue“ Nuklide bestimmt bzw. für „alte“ Nuklide abgeändert werden können / sollen, diese flexibel in das Programm geladen werden und für die Berechnung verwendet werden können.

Durch den modularen Aufbau des Programms ist es zudem leicht möglich, weitere, z.B. transportspezifische Szenarien und Pfade in die Berechnungsmethodik einzubauen und das Programm an geänderte Vorschriften anzupassen.

## Literatur

- /ASS 91/ Asselineau, J. M. Chapuis, A. M., Guetat, Ph, and Renaud, Ph.: Determination of radioactivity levels and recommendations for the exemption of radioactive waste arising outside the nuclear fuel cycle. Commissariat à l'Energie Atomique, final report, 1991;  
Nur auf Französisch verfügbar. Originaltitel: Détermination des niveaux de radioactivité et recommandations pour l'exemption de déchets radioactifs ne provenant pas du cycle de combustible nucléaire
- /BER 71/ M. J. Berger: „Distribution of absorbed dose around point sources of electrons and beta particles in water and other media“ (MIRD Pamphlet No. 7, Suppl. No. 5), J. Nuc. Med. 12 (5)
- /BER 73/ M. J. Berger: „Improved Point Kernels for Electron and Beta-Ray Dosimetry“, National Bureau of Standards NBSIR 73-107, Washington D.C., 1973
- /BER 74/ M. J. Berger: „Beta-ray dose in tissue-equivalent material immersed in a radioactive cloud“, Health Phys. 26 (1)
- /CHP 88/ Chaptinel, Y.; Durand, F.; Piechowski, J.; and Monoux, B.: „Dosimetry and therapy of skin contamination“, Commissariat à l'Energie Atomique, CEA-R-5441, 1988  
Verfügbar nur in Französisch “Dosimetrie et therapeutique des contaminations cutanees”
- /ECK 80/ Eckermann K. F., G. D. Kerr und R. Raridon: Organ Doses from Isotropic Cloud Sources of Gamma Rays”, Präsentation bei der 25th Ann. Meeting of the Health Physics Society, Seattle, WA, 20-25 Juli 1980; Health Physics 39, 1054, 1980; NICHT AUFFINDBAR
- /EC 93/ Commission of the European Communities: Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption values) Below which Reporting is not Required in the European Directive, Radiation Protection - 65, 1993

- /GRS 14/ Büttner, U.: Weiterentwicklung der Analysemethode zur Bewertung der Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe und Untersuchungen zu aktuellen Fragestellungen sowie zur Fortentwicklung der Transportvorschriften, Entwicklung eines Modellsystems zur Ableitung von Aktivitätsgrenzwerten – Q-Modell, GRS-Bericht ENTWURF, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Stand 14.08.2014
- /HPA 11/ Jones, K. A.; Cabianna, T.; Harvey, M. P.; Hughes, J. S.; Brown, I. K.; Anderson, T.: Review of Methodologies to Calculate  $A_1$  and  $A_2$  Values and Exemption Values. Health Protection Agency, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, HPA-CRCE-027, October 2011
- /IAEA 96/ Atomic Energy Agency (IAEA): International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources (BSS), Safety Series No. 115, IAEA, Vienna 1996
- /IAEA 08/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Guide No. TS-G-1.1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2008
- /IAEA 12a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition), Specific Safety Guide No. SSG-26, IAEA, Vienna, 2012
- /ICRP 82/ International Commission on Radiological Protection (ICRP). Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, 3, Nos. 1-4, Supplement to Part 1 (1979); 5 Nos. 1-6, Supplement to Part 2 (1981); 7, Nos. 1-3 Supplement A to Part 3 (1982); 8 Nos. 1-3, Supplement B to Part 3, also addendum to Supplements Part 1 and Part 2 (1982)
- /ICRP 83/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. In: Annals of the ICRP, Volume 11-13, Pergamon Press, Oxford, 1983

- /ICRP 94/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Replacement of ICRP Publication 61, ICRP Publication 68. In: Annals of the ICRP, Volume 24, No. 4, Pergamon, 1994
- /ICRP 96/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Age dependent doses to members of the public for intakes of radionuclides: Part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients, ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, Volume 26, No. 1, 1996
- /ICRP 08/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. In: Annals of the ICRP, Volume 38, No. 3, Elsevier, 2008
- /JON 13/ K. Jones (2013), persönliche Mitteilung; Email vom 19.09.2013
- /KLE 90/ Klein, R. C., Party, E. und Gershey, E. L.: Volatilitiy of S<sup>35</sup>, Health Physics 58, No. 3, 355-358, 1990 NICHT AUFFINDBAR
- /KOC 83/ Kocher, D. C.: Dose-Rate Conversion Factors For External Exposure To Photons And Electrons. Health and Safety Research Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37830, 1983
- /KOC 87/ Kocher, D.C. und Eckerman K. F.: Electron Dose-Rate Conversion Factors For External Exposure Of The Skin From Uniformly Deposited Activity On The Body Surface. Health and Safety Research Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, Februar 1987
- /MOB 99/ Mobbs, S. F. und Harvey, M. P.: Exempt Concentrations and Quantities for Radionuclides not included in the European Basic Safety Standards Directive, National Radiological Protection Board, Chilton, April 1999
- /PHI 91/ Phipps, A. W., Kendall, G. M., Stather, J. W., and Fell, T. P.: Committed Equivalent Organ Dose and Committed Effective Dose from Intakes of Radionuclides. Chilton, NRPB-R245 (1991) (London, HMSO)



## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BSS	Basic Safety Standards
DPUI	Dose Per Unit Intake
EU	Europäische Union
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
HPA	Health Protection Agency (Vereinigtes Königreich)
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation; engl. IAEA: International Atomic Energy Agency
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission; engl.: International Commission on Radiological Protection
RP 65	Synonym verwendet für /EC 93/
TAG	Teilarbeitsgebiet
VBA	Visual Basic for Applications





## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Betrachtete Szenarien im Modell zur Berechnung der Freigrenzen nach RP 65.....	4
Tab. 2.2	Radiologische Kriterien für die Bestimmung der Aktivität bzw. der Aktivitätskonzentration der Freigrenzen .....	5
Tab. 2.3	Nuklidabhängige Dosisparameter zur Berechnung der Aktivität und der Aktivitätskonzentration nach RP 65 sowie die dort verwendeten Referenzen.....	7
Tab. 2.4	In RP 65 berücksichtigte Zerfallsreihen.....	9
Tab. 2.5	Parameter für die einzelnen Quelltypen .....	21
Tab. 2.6	Werte für CONTACT.....	23
Tab. 3.1	Nach /HPA 11/ korrigierte nuklidabhängige Parameter .....	37
Tab. 3.2	Abweichungen größer 10 % zwischen den in RP 65 veröffentlichten und den neu berechneten Freigrenzen .....	39
Tab. 3.3	Abweichungen bei den berechneten Freigrenzen für Aktivitäten bei Nukliden, für die der Pfad B3.2 entscheidend ist.....	43
Tab. 3.4	Übersicht über die verwendeten nuklidabhängigen Parameter in den einzelnen Szenarien. Grün hinterlegt sind die leicht zu aktualisierenden Parameter .....	46



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der Berechnungsmethodik für die Aktivitäten und Aktivitätskonzentrationen der Freigrenzen nach /EC 93/ .....	8
Abb. 3.1	Visualisierung von „Dose Rate Factors“ über der Elektronenenergie aus /KOC 87/ (links) sowie die Visualisierung eigener Berechnungen (rechts) .....	48
Abb. 4.1	Startansicht des Programms GRS_BerFG.xlsm. ....	52
Abb. 4.2	Bedienoberfläche „Alternative Datenquelle auswählen“ .....	56



## Anhang

### A Freigrenzen für die Aktivitätskonzentration

In der folgenden Tabelle sind die mit dem Programm *BerFG* berechneten ungerundeten Freigrenzen für die Aktivitätskonzentration den in RP 65 dokumentierten Werten gegenübergestellt. Abweichungen, die größer als 10 % betragen, sind farblich markiert.

Die Pfade, die laut RP 65 entscheidend und in der Tabelle dokumentiert sind, sind wie folgt abgekürzt:

EXT(W) „External in workplace from 1m cubed source“: Pfad A1.2

EXTG(W) „External in workplace from gas bottle“: Pfad A1.3

INH(W) „Inhalation in workplace“: Pfad A1.4

ING ACC(P) „Accidental ingestion to public from landfill“: Pfad A3.3

**Tab. A.1** Gegenüberstellung der mit dem Programm BerFG berechneten und den in RP 65 dokumentierten Freigrenzen für die Aktivitätskonzentration

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>H-3</b>	liquid, solid, gas vapour, foil	5,56E+05	5,56E+05	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Be-7</b>	solid	3,37E+02	3,37E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>C-14</b>	liquid, solid, gas vapour	1,79E+04	1,79E+04	9,98E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>O-15</b>	gas vapour	1,09E+02	1,09E+02	9,99E-01	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden. R10 unbestimmt. Pfad A1.4 kann nicht berechnet werden. R9 unbestimmt. Pfad A1.5 konnte nicht berechnet werden.
<b>F-18</b>	liquid, solid	1,63E+01	1,63E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Na-22</b>	liquid, solid	7,61E+00	7,60E+00	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Na-24</b>	liquid	4,04E+00	4,03E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Si-31</b>	liquid, solid	1,35E+03	1,33E+03	9,86E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>P-32</b>	liquid, solid	9,29E+02	9,07E+02	9,77E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>P-33</b>	liquid, solid	4,00E+04	4,11E+04	1,03E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>S-35</b>	liquid, solid	3,33E+04	3,36E+04	1,01E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Cl-36</b>	liquid, solid	8,25E+03	8,29E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cl-38</b>	liquid, solid	1,01E+01	1,01E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ar-37</b>	gas vapour	4,89E+05	4,89E+05	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour)
<b>Ar-41</b>	gas vapour	8,68E+01	8,66E+01	9,97E-01	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>K-40</b>	solid	1,01E+02	1,01E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>K-42</b>	solid	4,12E+01	4,09E+01	9,92E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>K-43</b>	liquid, solid	1,72E+01	1,72E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ca-45</b>	solid	1,12E+04	1,13E+04	1,01E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Ca-47</b>	liquid, solid	1,57E+01	1,56E+01	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sc-46</b>	liquid, solid	8,29E+00	8,29E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sc-47</b>	liquid, solid	1,54E+02	1,53E+02	9,95E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sc-48</b>	liquid, solid	4,97E+00	4,97E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>V-48</b>	liquid, solid	1,63E+01	1,63E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cr-51</b>	liquid, solid	5,29E+02	5,29E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mn-51</b>	liquid, solid	1,61E+01	1,61E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mn-52</b>	liquid, solid	4,84E+00	4,84E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mn-52m</b>	liquid, solid	6,73E+00	6,72E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mn-53</b>	liquid, solid	1,19E+04	1,19E+04	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mn-54</b>	liquid	1,99E+01	1,99E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mn-56</b>	liquid, solid	9,70E+00	9,70E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Fe-52</b>	liquid	2,25E+01	2,25E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Fe-55</b>	foil	2,50E+04	2,50E+04	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, foil)
<b>Fe-59</b>	liquid	1,40E+01	1,40E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-55</b>	liquid, solid	8,35E+00	8,35E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-56</b>	liquid	4,68E+00	4,68E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-57</b>	liquid, solid	1,33E+02	1,33E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-58</b>	liquid, solid	1,70E+01	1,71E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-58m</b>	liquid, solid	8,16E+03	8,16E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-60</b>	liquid, capsule	6,64E+00	6,66E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)



Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Co-60m</b>	liquid, solid	2,34E+03	2,35E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-61</b>	liquid, solid	1,72E+02	1,72E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Co-62m</b>	liquid, solid	6,05E+00	6,05E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ni-59</b>	liquid, solid	6,69E+03	6,66E+03	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ni-63</b>	foil	5,26E+04	5,26E+04	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, foil)
<b>Ni-65</b>	liquid, solid	2,96E+01	2,96E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cu-64</b>	liquid, solid	8,71E+01	8,71E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Zn-65</b>	liquid, solid	2,87E+01	2,97E+01	1,03E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Zn-69</b>	liquid, solid	7,63E+03	7,64E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Zn-69m</b>	liquid	4,01E+01	4,01E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ga-72</b>	liquid, solid	6,20E+00	6,27E+00	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ge-71</b>	liquid, solid	3,98E+03	3,98E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>As-73</b>	liquid, solid	1,02E+03	1,02E+03	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>As-74</b>	liquid, solid	2,19E+01	2,20E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>As-76</b>	liquid, solid	3,45E+01	3,44E+01	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>As-77</b>	liquid, solid	1,74E+03	1,74E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Se-75</b>	liquid, solid	4,29E+01	4,53E+01	1,05E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Br-82</b>	liquid, solid	6,34E+00	6,34E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Kr-74</b>	gas vapour	9,66E+01	9,66E+01	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Kr-76</b>	gas vapour	2,58E+02	2,58E+02	9,99E-01	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Kr-77</b>	gas vapour	1,10E+02	1,10E+02	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
						nicht berechnet werden.
<b>Kr-79</b>	gas vapour	4,34E+02	4,34E+02	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour)
<b>Kr-81</b>	gas vapour	9,42E+03	9,42E+03	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour)
<b>Kr-83m</b>	gas vapour	4,15E+04	4,15E+04	9,99E-01	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Kr-85</b>	gas vapour	5,24E+04	5,24E+04	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour)
<b>Kr-85m</b>	gas vapour	7,03E+02	7,03E+02	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Kr-87</b>	gas vapour	1,41E+02	1,41E+02	9,97E-01	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Kr-88</b>	gas vapour	5,79E+01	5,79E+01	9,99E-01	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Rb-86</b>	liquid, solid	1,51E+02	1,51E+02	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-85</b>	liquid, solid	3,25E+01	3,26E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-85m</b>	liquid	7,61E+01	7,61E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-87m</b>	liquid	5,21E+01	5,20E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-89</b>	liquid, solid	1,34E+03	1,31E+03	9,77E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-90+</b>	liquid, solid, foil	1,58E+02	1,56E+02	9,89E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-91</b>	liquid, solid	2,35E+01	2,35E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-92</b>	liquid, solid	1,24E+01	1,24E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Y-90</b>	liquid, solid	4,24E+02	4,14E+02	9,75E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Y-91</b>	liquid, solid	9,71E+02	9,55E+02	9,84E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Y-91m</b>	liquid, solid	3,14E+01	3,14E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Y-92</b>	liquid, solid	4,36E+01	4,32E+01	9,92E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Y-93</b>	liquid, solid	1,03E+02	1,02E+02	9,87E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Zr-93+</b>	liquid, solid	2,20E+03	2,22E+03	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Zr-95</b>	liquid, solid	2,25E+01	2,25E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Zr-97+</b>	liquid, solid	1,96E+01	1,96E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Nb-93m</b>	liquid, solid	5,98E+03	5,99E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Nb-94</b>	liquid, solid	1,05E+01	1,05E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Nb-95</b>	liquid, solid	2,16E+01	2,18E+01	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Nb-97</b>	liquid, solid	2,53E+01	2,53E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Nb-98</b>	liquid, solid	6,76E+00	6,76E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mo-90</b>	liquid, solid	2,02E+01	2,02E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mo-93</b>	liquid, solid	1,55E+03	1,55E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mo-99</b>	liquid, solid	1,07E+02	1,07E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Mo-101</b>	liquid, solid	1,25E+01	1,25E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-96</b>	liquid, solid	6,69E+00	6,69E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-96m</b>	liquid, solid	3,26E+02	3,26E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-97</b>	liquid, solid	1,46E+03	1,46E+03	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-97m</b>	liquid, solid	1,67E+03	1,67E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-99</b>	liquid, solid	1,49E+04	1,49E+04	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Tc-99m</b>	liquid, solid	1,32E+02	1,32E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-97</b>	liquid, solid	6,97E+01	6,97E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-103</b>	liquid	3,54E+01	3,54E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-105</b>	liquid, solid	2,13E+01	2,13E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-106+</b>	liquid, solid	4,94E+01	4,90E+01	9,92E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Rh-103m</b>	liquid, solid	9,51E+03	9,51E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Rh-105</b>	liquid, solid	2,14E+02	2,14E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pd-103</b>	liquid, solid	1,15E+03	1,15E+03	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pd-109</b>	liquid, solid	9,77E+02	9,70E+02	9,93E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ag-105</b>	liquid, solid	3,19E+01	3,19E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ag-108m+</b>	liquid, solid	1,02E+01	1,02E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ag-110m</b>	liquid, solid	6,08E+00	6,08E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ag-111</b>	liquid, solid	5,58E+02	5,58E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cd-109</b>	foil	3,34E+03	3,35E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, foil)
<b>Cd-115</b>	liquid, solid	7,13E+01	7,13E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cd-115m</b>	liquid, solid	4,70E+02	4,67E+02	9,93E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>In-111</b>	liquid, solid	4,32E+01	4,32E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>In-113m</b>	liquid, solid	6,47E+01	6,47E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>In-114m</b>	liquid, solid	1,72E+02	1,73E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>In-115m</b>	liquid, solid	1,03E+02	1,03E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sn-113</b>	liquid, solid	7,20E+02	7,20E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sn-125</b>	liquid, solid	4,93E+01	4,92E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sb-122</b>	liquid, capsule	3,70E+01	3,70E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sb-124</b>	liquid, solid	9,20E+00	9,21E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sb-125</b>	liquid, solid	3,99E+01	3,99E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-123m</b>	liquid, solid	1,12E+02	1,12E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-125m</b>	liquid, solid	1,46E+03	4,66E+02	3,20E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-127</b>	liquid, solid	2,98E+03	2,98E+03	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-127m</b>	liquid, solid	1,41E+03	1,41E+03	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-129</b>	liquid, solid	2,44E+02	2,43E+02	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Te-129m</b>	liquid, solid	4,25E+02	4,26E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-131</b>	liquid, solid	3,84E+01	3,84E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-131m</b>	liquid, solid	1,22E+01	1,22E+01	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-132</b>	liquid, solid	7,23E+01	7,23E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-133</b>	liquid, solid	1,75E+01	1,75E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-133m</b>	liquid, solid	7,26E+00	7,25E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-134</b>	liquid, solid	1,88E+01	1,93E+01	1,02E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-123</b>	liquid, solid	1,13E+02	1,13E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-125</b>	liquid, solid	3,86E+02	3,86E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-126</b>	liquid, solid	3,65E+01	3,65E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-129</b>	liquid, solid	9,09E+01	9,09E+01	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>I-130</b>	liquid, solid	7,82E+00	7,82E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-131</b>	liquid, solid	5,38E+01	4,36E+01	8,11E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-132</b>	liquid, solid	7,42E+00	7,42E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-133</b>	liquid, solid	2,75E+01	2,75E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-134</b>	liquid, solid	6,45E+00	6,45E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-135</b>	liquid, solid	1,07E+01	1,07E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Xe-131m</b>	gas vapour	5,55E+03	5,56E+03	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour)
<b>Xe-133</b>	gas vapour	2,41E+03	2,42E+03	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour)
<b>Xe-135</b>	gas vapour	4,48E+02	4,48E+02	1,00E+00	EXTG(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Cs-129</b>	liquid, capsule	5,93E+01	5,93E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cs-131</b>	liquid, capsule	7,30E+02	7,30E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cs-132</b>	liquid, capsule	2,37E+01	2,37E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Cs-134m</b>	liquid, capsule	6,17E+02	6,17E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cs-134</b>	liquid, capsule	6,17E+02	6,17E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cs-135</b>	liquid, capsule	5,26E+03	5,26E+03	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Cs-136</b>	liquid, capsule	7,75E+00	7,75E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cs-137+</b>	capsule	2,95E+01	2,95E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, capsule)
<b>Cs-138</b>	liquid, capsule	6,96E+00	6,97E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ba-131</b>	liquid, solid	3,67E+01	3,67E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ba-140+</b>	liquid, solid	6,62E+00	6,62E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>La-140</b>	liquid, solid	7,19E+00	7,19E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ce-139</b>	liquid	1,05E+02	1,05E+02	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ce-141</b>	liquid, solid	2,17E+02	2,17E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ce-143</b>	liquid, solid	5,86E+01	5,86E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ce-144+</b>	liquid, solid	1,18E+02	1,16E+02	9,86E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pr-142</b>	liquid, solid	1,97E+02	1,95E+02	9,92E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pr-143</b>	solid	5,25E+03	5,54E+03	1,06E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Nd-147</b>	liquid, solid	1,18E+02	1,18E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Nd-149</b>	liquid, solid	4,34E+01	4,34E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pm-147</b>	foil	1,49E+04	1,51E+04	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, foil)
<b>Pm-149</b>	liquid, solid	1,14E+03	1,06E+03	9,30E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sm-151</b>	liquid, solid	2,93E+04	2,95E+04	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sm-153</b>	liquid, solid	2,66E+02	2,66E+02	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Eu-152</b>	solid	1,44E+01	1,44E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Eu-152m</b>	liquid, solid	5,57E+01	5,56E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Eu-154</b>	solid	1,34E+01	1,34E+01	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Eu-155</b>	solid	2,84E+02	2,84E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Gd-153</b>	liquid, solid	1,58E+02	1,58E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Gd-159</b>	liquid, solid	3,23E+02	3,23E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tb-160</b>	liquid, solid	1,49E+01	1,49E+01	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Dy-165</b>	liquid, solid	5,31E+02	5,29E+02	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Dy-166</b>	liquid, solid	4,07E+02	4,08E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ho-166</b>	liquid, solid	3,59E+02	3,56E+02	9,92E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Er-169</b>	solid	1,61E+04	1,74E+04	1,08E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Er-171</b>	liquid, solid	4,35E+01	4,35E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tm-170</b>	solid	1,96E+03	1,97E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Tm-171</b>	liquid, solid	2,01E+04	2,02E+04	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Yb-175</b>	liquid, solid	4,17E+02	4,17E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Lu-177</b>	liquid, solid	5,21E+02	5,21E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Hf-181</b>	liquid, solid	3,00E+01	3,00E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ta-182</b>	solid, capsule, foil	1,29E+01	1,29E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>W-181</b>	liquid, solid	4,12E+02	4,12E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>W-185</b>	liquid, solid	1,20E+04	1,22E+04	1,01E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>W-187</b>	liquid, solid	3,47E+01	3,49E+01	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Re-186</b>	liquid	7,08E+02	7,08E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Re-188</b>	liquid, solid	2,06E+02	2,04E+02	9,92E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Os-185</b>	liquid, solid	2,32E+01	2,32E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Os-191</b>	liquid, solid	2,09E+02	2,09E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Os-191m</b>	liquid, solid	1,79E+03	1,79E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Os-193</b>	liquid, solid	2,17E+02	2,17E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ir-190</b>	liquid, solid	1,16E+01	1,15E+01	9,95E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ir-192</b>	solid, capsule, foil	2,03E+01	2,03E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Ir-194</b>	liquid, solid	1,44E+02	1,44E+02	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pt-191</b>	liquid, solid	5,53E+01	5,53E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pt-193m</b>	liquid, solid	1,26E+03	1,26E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pt-197</b>	liquid, solid	6,39E+02	6,39E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pt-197m</b>	liquid, solid	1,96E+02	1,96E+02	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Au-198</b>	liquid, solid	4,10E+01	4,10E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Au-199</b>	liquid, solid	1,87E+02	1,87E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Hg-197</b>	liquid, solid	2,38E+02	2,38E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Hg-197m</b>	liquid, solid	1,76E+02	1,76E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Hg-203</b>	solid, capsule	7,02E+01	7,02E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Tl-200</b>	liquid, solid	1,29E+01	1,29E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tl-201</b>	solid, foil	1,88E+02	1,88E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Tl-202</b>	liquid, solid	3,57E+01	3,57E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tl-204</b>	foil	8,09E+03	8,09E+03	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, foil)
<b>Pb-203</b>	liquid, solid	5,34E+01	5,34E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pb-210+</b>	solid	5,21E+00	5,21E+00	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Pb-212+</b>	liquid, solid	1,05E+01	1,04E+01	9,95E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Bi-206</b>	liquid	5,13E+00	5,13E+00	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Bi-207</b>	liquid, solid	1,08E+01	1,08E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Bi-210</b>	liquid, solid	1,42E+03	1,45E+03	1,02E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Bi-212+</b>	liquid, solid	1,18E+01	1,18E+01	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Po-203</b>	liquid, solid	1,02E+01	1,02E+01	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Po-205</b>	liquid, solid	1,08E+01	1,08E+01	9,95E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Po-207</b>	liquid, solid	1,26E+01	1,26E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Po-210</b>	solid	1,61E+01	1,62E+01	1,01E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)



Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>At-211</b>	liquid, solid	3,95E+02	3,96E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Rn-220+</b>	gas vapour	3,44E+03	3,74E+03	1,09E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R9 unbestimmt. Pfad A1.5 konnte nicht berechnet werden.
<b>Rn-222+</b>	gas vapour	9,52E+00	9,53E+00	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, gas vapour) R9 unbestimmt. Pfad A1.5 konnte nicht berechnet werden.
<b>Ra-223+</b>	liquid, solid	3,99E+01	4,00E+01	1,00E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ra-224+</b>	liquid, solid	9,58E+00	9,88E+00	1,03E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ra-225</b>	liquid, solid	7,05E+01	7,11E+01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ra-226+</b>	solid, solid massive	4,67E+00	4,67E+00	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Ra-227</b>	liquid, solid	9,74E+01	9,74E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ra-228+</b>	liquid, solid	1,52E+01	1,52E+01	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ac-228</b>	liquid, solid	1,77E+01	1,77E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Th-226+</b>	liquid, solid	8,39E+02	8,39E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Th-227</b>	liquid, solid	4,18E+00	4,21E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Th-228+</b>	solid, solid massive	1,50E+00	1,51E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Th-229+</b>	liquid, solid	4,21E-01	4,25E-01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Th-230</b>	solid, solid massive	2,94E+00	2,97E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Th-231</b>	liquid, solid	6,52E+02	6,52E+02	1,00E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Th-232N</b>	solid, solid massive, capsule(gem)	8,49E-01	8,55E-01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Th-234+</b>	liquid, solid	3,11E+02	3,07E+02	9,86E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pa-230</b>	liquid, solid	2,42E+01	2,42E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pa-231</b>	liquid, solid	8,81E-01	8,89E-01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pa-233</b>	liquid, solid	8,19E+01	8,19E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-230+</b>	liquid, solid	2,78E+01	2,80E+01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>U-231</b>	liquid, solid	2,03E+02	2,03E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-232+</b>	liquid, solid	5,54E-01	5,58E-01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-233</b>	liquid, solid	4,17E+00	4,21E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-234</b>	solid, solid massive	4,29E+00	4,33E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>U-235+</b>	liquid, solid	4,34E+00	4,37E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-236</b>	liquid, solid	4,55E+00	4,59E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-237</b>	liquid, solid	1,17E+02	1,17E+02	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-238+</b>	solid, solid massive	4,76E+00	4,80E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>U-238N</b>	solid, solid massive, capsule(gem)	1,83E+00	1,84E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>U-239</b>	liquid, solid	3,00E+02	3,00E+02	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-240</b>	liquid, solid	2,13E+03	2,13E+03	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>U-240+</b>	liquid, solid	1,25E+01	1,25E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Np-237+</b>	liquid, solid	1,87E+00	1,89E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Np-239</b>	liquid, solid	9,65E+01	9,65E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Np-240</b>	liquid, solid	1,26E+01	1,26E+01	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-234</b>	liquid, solid	2,41E+02	2,41E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-235</b>	liquid, solid	1,77E+02	1,77E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-236</b>	liquid, solid	5,17E+00	5,22E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-237</b>	liquid, solid	3,18E+02	3,18E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-238</b>	solid	2,42E+00	2,44E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Pu-239</b>	foil	2,21E+00	2,23E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, foil)
<b>Pu-240</b>	liquid, solid	2,21E+00	2,23E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-241</b>	liquid, solid	1,15E+02	1,17E+02	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-242</b>	liquid, solid	2,31E+00	2,33E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-243</b>	liquid, solid	6,45E+02	6,42E+02	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Pu-244</b>	liquid, solid	2,34E+00	2,37E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Am-241</b>	capsule, foil	2,14E+00	2,16E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, capsule)
<b>Am-242</b>	liquid, solid	8,31E+02	8,32E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Am-242m+</b>	liquid, solid	2,23E+00	2,25E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Am-243+</b>	liquid, solid	2,08E+00	2,10E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cm-242</b>	liquid, solid	4,27E+01	4,31E+01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cm-243</b>	liquid, solid	2,99E+00	3,02E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cm-244</b>	solid	3,75E+00	3,79E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Cm-245</b>	liquid, solid	2,06E+00	2,08E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cm-246</b>	liquid, solid	2,08E+00	2,10E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cm-247</b>	liquid, solid	2,18E+00	2,20E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cm-248</b>	liquid, solid	5,77E-01	5,83E-01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Bk-249</b>	liquid, solid	7,50E+02	7,57E+02	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid) R7 oder R24 unbestimmt: Pfad A1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Cf-246</b>	liquid, solid	8,72E+02	8,80E+02	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cf-248</b>	liquid, solid	1,15E+01	1,16E+01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cf-249</b>	liquid, solid	1,71E+00	1,72E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cf-250</b>	liquid, solid	3,41E+00	3,44E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cf-251</b>	liquid, solid	1,70E+00	1,72E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cf-252</b>	solid, capsule, foil	3,84E+00	3,87E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Cf-253</b>	liquid, solid	1,83E+02	1,84E+02	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Cf-254</b>	liquid, solid	1,92E+00	1,94E+00	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Es-253</b>	liquid, solid	1,61E+02	1,63E+02	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Es-254</b>	liquid, solid	2,09E+01	2,11E+01	1,01E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäts-Konzentrationen			Szenario Konzentration	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Es-254m</b>	liquid, solid	3,45E+01	3,45E+01	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Fm-254</b>	liquid, solid	5,92E+03	5,95E+03	1,00E+00	INH(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Fm-255</b>	liquid, solid	7,82E+02	7,85E+02	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)



## **B            Aktivitätskonzentrationen**

In der folgenden Tabelle sind die mit dem Programm *BerFG* berechneten ungerundeten Freigrenzen den in RP 65 dokumentierten Werten gegenübergestellt. Abweichungen, die größer als 10 % betragen, sind farblich markiert.

Die Szenarien, die laut RP 65 entscheidend und in der Tabelle dokumentiert sind, gelten, sind wie folgt abgekürzt:

SKIN(W)	„Skin dose in workplace“: Pfad B1.2 Hautdosis
EXT(W)	„External in workplace (effective skin + point source)“: Pfad B1.2
INH ACCF(W)	„Inhalation in workplace from fire“: Pfad B2.8
EXT ACCF(W)	„External in workplace from fire“: Pfad B2.9
INH ACC(P)	„Accidental inhalation to public from landfil“: Pfad B3.2
ING ACC(P)	„Accidental ingestion to public from landfil“: Pfad B3.4

**Tab. B.1** Gegenüberstellung der mit dem Programm BerFG berechneten und den in RP 65 dokumentierten Freigrenzen für die Aktivitäten

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
H-3	liquid, solid, gas vapour, foil	5,50E+08	5,50E+08	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
Be-7	solid	1,91E+07	1,91E+07	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
C-14	liquid, solid, gas vapour	1,77E+07	1,77E+07	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
O-15	gas vapour	1,07E+09	1,06E+09	9,94E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour) R10 unbestimmt: Pfad B2.8 kann nicht berechnet werden. R10 unbestimmt: Pfad B3.2 kann nicht berechnet werden. DECAY oder R9 unbestimmt: Pfad B3.4 kann nicht berechnet werden.
F-18	liquid, solid	6,20E+05	6,27E+05	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Na-22	liquid, solid	3,42E+05	3,42E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Na-24	liquid	2,11E+05	2,11E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Si-31	liquid, solid	3,92E+05	3,92E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
P-32	liquid, solid	2,51E+05	2,51E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
P-33	liquid, solid	4,03E+07	4,03E+07	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
S-35	liquid, solid	3,29E+07	3,29E+07	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
Cl-36	liquid, solid	1,68E+06	1,68E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
Cl-38	liquid, solid	6,12E+04	6,12E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Ar-37	gas vapour	1,18E+08	1,84E+08	1,56E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, gas vapour)
Ar-41	gas vapour	8,58E+08	8,49E+08	9,90E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
K-40	solid	7,54E+05	7,54E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
K-42	solid	3,17E+05	3,17E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
K-43	liquid, solid	5,66E+05	5,66E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
Ca-45	solid	1,11E+07	1,11E+07	9,96E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
Ca-47	liquid, solid	5,15E+05	5,15E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Sc-46	liquid, solid	4,58E+05	4,56E+05	9,95E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Sc-47	liquid, solid	2,29E+06	2,30E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Sc-48	liquid, solid	2,51E+05	2,52E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
V-48	liquid, solid	1,78E+05	1,78E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Cr-51	liquid, solid	6,67E+06	6,67E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Mn-51	liquid, solid	1,36E+05	1,36E+05	9,97E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Mn-52	liquid, solid	2,65E+05	2,65E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Mn-52m	liquid, solid	9,17E+04	9,16E+04	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Mn-53	liquid, solid	3,81E+08	3,81E+08	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
Mn-54	liquid	1,11E+06	1,11E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Mn-56	liquid, solid	1,56E+05	1,56E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Fe-52	liquid	1,27E+06	1,27E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Fe-55	foil	6,25E+05	6,25E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, foil)
Fe-59	liquid	7,39E+05	7,39E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Co-55	liquid, solid	3,19E+05	3,19E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Co-56	liquid	2,68E+05	2,68E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Co-57	liquid, solid	2,50E+06	2,50E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Co-58	liquid, solid	8,19E+05	8,19E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Co-58m	liquid, solid	6,67E+06	6,67E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Co-60	liquid, capsule	6,31E+04	6,31E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Co-60m	liquid, solid	1,43E+06	1,43E+06	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Co-61	liquid, solid	6,07E+05	6,07E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Co-62m	liquid, solid	1,02E+05	1,03E+05	1,01E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)



Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
Ni-59	liquid, solid	1,33E+08	1,33E+08	9,98E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
Ni-63	foil	4,83E+07	4,83E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, foil)
Ni-65	liquid, solid	3,05E+05	3,05E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Cu-64	liquid, solid	2,19E+06	2,20E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Zn-65	liquid, solid	1,58E+06	1,58E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Zn-69	liquid, solid	1,30E+06	1,30E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Zn-69m	liquid	2,27E+06	2,26E+06	9,94E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Ga-72	liquid, solid	2,50E+05	2,50E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Ge-71	liquid, solid	2,26E+08	2,26E+08	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
As-73	liquid, solid	7,24E+06	7,24E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
As-74	liquid, solid	7,41E+05	7,41E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
As-76	liquid, solid	1,08E+05	1,07E+05	9,93E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
As-77	liquid, solid	1,96E+06	1,96E+06	9,98E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
Se-75	liquid, solid	2,31E+06	2,31E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Br-82	liquid, solid	3,27E+05	3,27E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Kr-74	gas vapour	9,52E+08	9,44E+08	9,92E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Kr-76	gas vapour	2,56E+09	2,54E+09	9,92E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Kr-77	gas vapour	1,08E+09	1,08E+09	9,96E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Kr-79	gas vapour	1,62E+05	1,62E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, gas vapour)
Kr-81	gas vapour	3,53E+06	3,53E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, gas vapour)
Kr-83m	gas vapour	3,49E+11	3,46E+11	9,92E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Kr-85	gas vapour	5,00E+03	4,90E+03	9,80E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, gas vapour)
Kr-85m	gas vapour	6,85E+09	6,79E+09	9,92E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Kr-87	gas vapour	1,37E+09	1,36E+09	9,91E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Kr-88	gas vapour	5,74E+08	5,69E+08	9,91E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Rb-86</b>	liquid, solid	2,74E+05	2,75E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Sr-85</b>	liquid, solid	1,77E+06	1,77E+06	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Sr-85m</b>	liquid	4,31E+06	4,31E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-87m</b>	liquid	2,95E+06	2,95E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Sr-89</b>	liquid, solid	3,44E+05	3,44E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Sr-90+</b>	liquid, solid, foil	5,68E+03	5,68E+03	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, foil)
<b>Sr-91</b>	liquid, solid	2,57E+05	2,68E+05	1,04E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Sr-92</b>	liquid, solid	5,29E+05	5,29E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Y-90</b>	liquid, solid	1,60E+05	1,60E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Y-91</b>	liquid, solid	3,24E+05	3,24E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Y-91m</b>	liquid, solid	1,78E+06	1,78E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Y-92</b>	liquid, solid	6,95E+04	6,96E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Y-93</b>	liquid, solid	9,77E+04	9,78E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Zr-93+</b>	liquid, solid	3,96E+06	3,92E+06	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Zr-95</b>	liquid, solid	1,16E+06	1,16E+06	9,96E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Zr-97+</b>	liquid, solid	2,36E+05	2,36E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Nb-93m</b>	liquid, solid	2,55E+07	2,53E+07	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Nb-94</b>	liquid, solid	5,41E+05	5,41E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Nb-95</b>	liquid, solid	1,23E+06	1,23E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Nb-97</b>	liquid, solid	4,71E+05	4,71E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Nb-98</b>	liquid, solid	1,32E+05	1,32E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Mo-90</b>	liquid, solid	7,74E+05	7,74E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Mo-93</b>	liquid, solid	3,79E+07	3,79E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Mo-99</b>	liquid, solid	8,88E+05	8,88E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Mo-101</b>	liquid, solid	3,11E+05	3,24E+05	1,04E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Tc-96</b>	liquid, solid	3,79E+05	3,79E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-96m</b>	liquid, solid	1,85E+07	1,85E+07	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-97</b>	liquid, solid	8,28E+07	8,28E+07	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tc-97m</b>	liquid, solid	5,13E+06	5,11E+06	9,97E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Tc-99</b>	liquid, solid	1,44E+07	1,44E+07	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Tc-99m</b>	liquid, solid	7,37E+06	7,37E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-97</b>	liquid, solid	3,95E+06	3,95E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-103</b>	liquid	2,02E+06	2,02E+06	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ru-105</b>	liquid, solid	5,41E+05	5,41E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ru-106+</b>	liquid, solid	1,01E+05	1,01E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Rh-103m</b>	liquid, solid	6,25E+07	6,25E+07	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Rh-105</b>	liquid, solid	3,10E+06	3,10E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Pd-103</b>	liquid, solid	3,31E+07	3,31E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Pd-109</b>	liquid, solid	7,41E+05	7,41E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Ag-105</b>	liquid, solid	1,80E+06	1,80E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Ag-108m+</b>	liquid, solid	5,45E+05	5,45E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ag-110m</b>	liquid, solid	3,36E+05	3,36E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ag-111</b>	liquid, solid	1,14E+06	1,14E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Cd-109</b>	foil	5,88E+05	5,88E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, foil)
<b>Cd-115</b>	liquid, solid	1,03E+06	1,03E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Cd-115m</b>	liquid, solid	3,20E+05	3,20E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>In-111</b>	liquid, solid	2,00E+06	2,00E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>In-113m</b>	liquid, solid	1,48E+06	1,48E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>In-114m</b>	liquid, solid	1,53E+06	1,54E+06	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>In-115m</b>	liquid, solid	1,94E+06	1,94E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Sn-113</b>	liquid, solid	8,17E+06	8,17E+06	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Sn-125</b>	liquid, solid	1,88E+05	1,87E+05	9,96E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Sb-122</b>	liquid, capsule	1,08E+04	1,08E+04	9,97E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
<b>Sb-124</b>	liquid, solid	3,74E+05	3,74E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Sb-125</b>	liquid, solid	1,88E+06	1,88E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Te-123m</b>	liquid, solid	6,25E+06	6,25E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Te-125m</b>	liquid, solid	5,56E+06	5,56E+06	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Te-127</b>	liquid, solid	1,95E+06	1,95E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Te-127m</b>	liquid, solid	4,09E+06	4,09E+06	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Te-129</b>	liquid, solid	4,09E+05	4,09E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Te-129m</b>	liquid, solid	2,22E+06	2,22E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Te-131</b>	liquid, solid	2,40E+05	2,41E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Te-131m</b>	liquid, solid	6,07E+05	6,07E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Te-132</b>	liquid, solid	3,50E+06	3,50E+06	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Te-133</b>	liquid, solid	1,73E+05	1,73E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Te-133m</b>	liquid, solid	2,01E+05	2,01E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Te-134</b>	liquid, solid	6,50E+05	6,58E+05	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>I-123</b>	liquid, solid	4,57E+06	4,57E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>I-125</b>	liquid, solid	6,70E+05	6,70E+05	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>I-126</b>	liquid, solid	3,44E+05	3,61E+05	1,05E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>I-129</b>	liquid, solid	9,04E+04	9,04E+04	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>I-130</b>	liquid, solid	3,50E+05	3,50E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>I-131</b>	liquid, solid	4,92E+05	4,92E+05	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>I-132</b>	liquid, solid	2,86E+05	2,86E+05	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>I-133</b>	liquid, solid	5,99E+05	5,99E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
I-134	liquid, solid	2,14E+05	2,14E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
I-135	liquid, solid	3,95E+05	3,95E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Xe-131m	gas vapour	8,64E+03	8,64E+03	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, gas vapour)
Xe-133	gas vapour	9,16E+03	9,17E+03	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, gas vapour)
Xe-135	gas vapour	4,38E+09	4,35E+09	9,92E-01	EXT ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour)
Cs-129	liquid, capsule	1,91E+05	1,91E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-131	liquid, capsule	4,33E+05	4,33E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-132	liquid, capsule	1,42E+05	1,42E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-134m	liquid, capsule	4,29E+04	4,29E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-134	liquid, capsule	4,29E+04	4,29E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-135	liquid, capsule	5,23E+06	5,23E+06	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
Cs-136	liquid, capsule	5,09E+04	5,09E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-137+	capsule	2,36E+04	2,36E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Cs-138	liquid, capsule	3,94E+03	3,94E+03	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
Ba-131	liquid, solid	2,08E+06	2,08E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
Ba-140+	liquid, solid	1,31E+05	1,31E+05	9,98E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
La-140	liquid, solid	2,71E+05	2,71E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Ce-139	liquid	1,11E+06	5,26E+06	4,74E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Ce-141	liquid, solid	3,78E+06	3,77E+06	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Ce-143	liquid, solid	6,85E+05	6,95E+05	1,01E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Ce-144+	liquid, solid	1,19E+05	1,19E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Pr-142	liquid, solid	1,95E+05	1,95E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
Pr-143	solid	1,20E+06	1,20E+06	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Effective, solid)
Nd-147	liquid, solid	1,57E+06	1,57E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
Nd-149	liquid, solid	4,62E+05	4,62E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Pm-147</b>	foil	1,85E+07	1,85E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, foil)
<b>Pm-149</b>	liquid, solid	1,13E+06	1,13E+06	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Sm-151</b>	liquid, solid	4,03E+07	3,99E+07	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Sm-153</b>	liquid, solid	1,62E+06	1,62E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Eu-152</b>	solid	7,19E+05	7,19E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Eu-152m</b>	liquid, solid	5,48E+05	5,48E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Eu-154</b>	solid	5,88E+05	5,88E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Eu-155</b>	solid	1,62E+07	1,62E+07	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Gd-153</b>	liquid, solid	8,98E+06	8,98E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Gd-159</b>	liquid, solid	1,29E+06	1,29E+06	9,97E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Tb-160</b>	liquid, solid	6,17E+05	6,18E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Dy-165</b>	liquid, solid	6,91E+05	6,91E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Dy-166</b>	liquid, solid	2,77E+06	2,77E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ho-166</b>	liquid, solid	2,71E+05	2,71E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Er-169</b>	solid	1,71E+07	1,71E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Er-171</b>	liquid, solid	7,14E+05	7,13E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Tm-170</b>	solid	1,25E+06	1,25E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Tm-171</b>	liquid, solid	5,10E+07	5,11E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Yb-175</b>	liquid, solid	3,33E+06	3,33E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Lu-177</b>	liquid, solid	3,02E+06	3,02E+06	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Hf-181</b>	liquid, solid	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ta-182</b>	solid, capsule, foil	1,99E+04	1,99E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
<b>W-181</b>	liquid, solid	2,34E+07	2,34E+07	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>W-185</b>	liquid, solid	3,52E+06	3,52E+06	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>W-187</b>	liquid, solid	8,04E+05	8,04E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Re-186</b>	liquid	1,64E+06	1,64E+06	9,98E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Re-188</b>	liquid, solid	2,10E+05	2,11E+05	1,01E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Os-185</b>	liquid, solid	1,29E+06	1,29E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Os-191</b>	liquid, solid	1,13E+07	1,13E+07	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Os-191m</b>	liquid, solid	6,84E+06	6,84E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Os-193</b>	liquid, solid	1,04E+06	1,04E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ir-190</b>	liquid, solid	5,64E+05	5,64E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Ir-192</b>	solid, capsule, foil	2,29E+04	2,29E+04	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
<b>Ir-194</b>	liquid, solid	1,94E+05	1,95E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Pt-191</b>	liquid, solid	2,25E+06	2,25E+06	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Pt-193m</b>	liquid, solid	3,25E+06	3,25E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Pt-197</b>	liquid, solid	1,76E+06	1,76E+06	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Pt-197m</b>	liquid, solid	1,16E+06	1,16E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Au-198</b>	liquid, solid	7,74E+05	7,74E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Au-199</b>	liquid, solid	2,63E+06	2,63E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Hg-197</b>	liquid, solid	4,44E+06	4,43E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Hg-197m</b>	liquid, solid	1,86E+06	1,86E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Hg-203</b>	solid, capsule	1,75E+05	1,75E+05	9,99E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
<b>Tl-200</b>	liquid, solid	7,31E+05	7,31E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tl-201</b>	solid, foil	5,00E+05	5,00E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, foil)
<b>Tl-202</b>	liquid, solid	2,02E+06	2,02E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Tl-204</b>	foil	1,75E+04	1,75E+04	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, foil)
<b>Pb-203</b>	liquid, solid	2,30E+06	2,30E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Pb-210+</b>	solid	5,10E+03	5,10E+03	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Pb-212+</b>	liquid, solid	1,66E+05	1,66E+05	9,97E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Bi-206</b>	liquid	2,93E+05	2,93E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Bi-207</b>	liquid, solid	5,36E+05	5,36E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Bi-210</b>	liquid, solid	9,51E+05	9,62E+05	1,01E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Bi-212+</b>	liquid, solid	2,21E+05	2,21E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Po-203</b>	liquid, solid	4,86E+05	4,86E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Po-205</b>	liquid, solid	5,69E+05	5,69E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Po-207</b>	liquid, solid	6,67E+05	6,67E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Po-210</b>	solid	1,57E+04	1,57E+04	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>At-211</b>	liquid, solid	7,46E+06	7,39E+06	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Rn-220+</b>	gas vapour	5,04E+06	5,00E+06	9,92E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour) DECAY oder R9 unbestimmt: Pfad B3.4 kann nicht berechnet werden.
<b>Rn-222+</b>	gas vapour	3,53E+07	3,33E+07	9,42E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, gas vapour) DECAY oder R9 unbestimmt: Pfad B3.4 kann nicht berechnet werden.
<b>Ra-223+</b>	liquid, solid	6,64E+04	6,64E+04	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Ra-224+</b>	liquid, solid	1,20E+05	1,20E+05	9,97E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Ra-225</b>	liquid, solid	1,01E+05	9,98E+04	9,88E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Ra-226+</b>	solid, solid massive	4,54E+03	4,54E+03	1,00E+00	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Ra-227</b>	liquid, solid	7,37E+05	7,37E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Ra-228+</b>	liquid, solid	3,55E+04	3,54E+04	9,97E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, liquid)
<b>Ac-228</b>	liquid, solid	5,27E+05	5,28E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Th-226+</b>	liquid, solid	1,57E+07	1,57E+07	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Th-227</b>	liquid, solid	5,78E+03	5,71E+03	9,87E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Th-228+</b>	solid, solid massive	8,78E+03	8,76E+03	9,98E-01	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Th-229+</b>	liquid, solid	5,69E+02	5,64E+02	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)



Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Th-230</b>	solid, solid massive	1,16E+04	1,16E+04	1,00E+00	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Th-231</b>	liquid, solid	2,63E+07	2,65E+07	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Th-232N</b>	solid, solid massive, capsule(gem)	1,55E+03	1,55E+03	9,99E-01	ING ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Th-234+</b>	liquid, solid	1,85E+05	1,84E+05	9,96E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Pa-230</b>	liquid, solid	5,17E+05	5,12E+05	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Pa-231</b>	liquid, solid	1,19E+03	1,17E+03	9,87E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Pa-233</b>	liquid, solid	3,18E+06	3,18E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>U-230+</b>	liquid, solid	3,88E+04	3,84E+04	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>U-231</b>	liquid, solid	4,38E+06	4,39E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>U-232+</b>	liquid, solid	7,85E+02	7,77E+02	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>U-233</b>	liquid, solid	5,60E+03	5,55E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>U-234</b>	solid, solid massive	2,57E+04	2,57E+04	1,00E+00	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>U-235+</b>	liquid, solid	6,11E+03	6,05E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>U-236</b>	liquid, solid	6,11E+03	6,05E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>U-237</b>	liquid, solid	1,86E+06	1,86E+06	9,98E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>U-238+</b>	solid, solid massive	2,84E+04	2,84E+04	1,00E+00	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>U-238N</b>	solid, solid massive, capsule(gem)	2,57E+03	2,57E+03	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, capsule)
<b>U-239</b>	liquid, solid	9,03E+05	9,13E+05	1,01E+00	EXT(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>U-240</b>	liquid, solid	7,08E+06	7,06E+06	9,97E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>U-240+</b>	liquid, solid	3,41E+05	3,41E+05	1,00E+00	SKIN(W)	Normal Use (Skin, liquid)
<b>Np-237+</b>	liquid, solid	2,58E+03	2,56E+03	9,92E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Np-239</b>	liquid, solid	3,04E+06	3,04E+06	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Np-240</b>	liquid, solid	4,62E+05	4,62E+05	9,99E-01	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Pu-234</b>	liquid, solid	1,38E+07	1,38E+07	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-235</b>	liquid, solid	1,00E+07	1,00E+07	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-236</b>	liquid, solid	6,95E+03	6,89E+03	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid) R19 oder R20 unbestimmt: Pfad B1.1 kann nicht berechnet werden.
<b>Pu-237</b>	liquid, solid	1,80E+07	1,80E+07	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, liquid)
<b>Pu-238</b>	solid	8,85E+03	8,85E+03	1,00E+00	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Pu-239</b>	foil	8,06E+03	8,06E+03	1,00E+00	INH ACC(P)	Disposal (Effective, foil)
<b>Pu-240</b>	liquid, solid	2,96E+03	2,94E+03	9,92E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Pu-241</b>	liquid, solid	1,55E+05	1,54E+05	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Pu-242</b>	liquid, solid	3,10E+03	3,07E+03	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Pu-243</b>	liquid, solid	3,53E+06	3,54E+06	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Pu-244</b>	liquid, solid	3,15E+03	3,12E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Am-241</b>	capsule, foil	7,87E+03	7,87E+03	1,00E+00	INH ACC(P)	Disposal (Effective, capsule)
<b>Am-242</b>	liquid, solid	3,00E+06	3,00E+06	9,98E-01	SKIN(W)	Normal Use (Skin, solid)
<b>Am-242m+</b>	liquid, solid	3,01E+03	2,98E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Am-243+</b>	liquid, solid	2,88E+03	2,85E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cm-242</b>	liquid, solid	5,76E+04	5,71E+04	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cm-243</b>	liquid, solid	4,11E+03	4,08E+03	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cm-244</b>	solid	1,39E+04	1,39E+04	9,99E-01	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Cm-245</b>	liquid, solid	2,80E+03	2,77E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cm-246</b>	liquid, solid	2,80E+03	2,77E+03	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cm-247</b>	liquid, solid	3,05E+03	3,03E+03	9,92E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cm-248</b>	liquid, solid	7,75E+02	7,68E+02	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Bk-249</b>	liquid, solid	1,01E+06	9,98E+05	9,88E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid) R19 oder R20 unbestimmt: Pfad B1.1 kann nicht berechnet werden. R7 oder R24 unbestimmt: Pfad B1.2 kann nicht berechnet werden R7 oder R8 unbestimmt: Pfad B2.1 kann nicht berechnet werden. R7 oder R8 unbestimmt: Pfad B2.2 kann nicht berechnet werden. R5 & R6 unbestimmt: Pfad B2.3 kann nicht berechnet werden. R7 oder R8 unbestimmt: Pfad B2.7 kann nicht berechnet werden. R7, R24 oder DECAY unbestimmt: Pfad B3.3 kann nicht berechnet werden.
<b>Cf-246</b>	liquid, solid	1,26E+06	1,25E+06	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid) R5 & R6 unbestimmt: Pfad B2.3 kann nicht berechnet werden.
<b>Cf-248</b>	liquid, solid	1,55E+04	1,54E+04	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cf-249</b>	liquid, solid	2,37E+03	2,35E+03	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cf-250</b>	liquid, solid	4,58E+03	4,54E+03	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cf-251</b>	liquid, solid	2,32E+03	2,30E+03	9,89E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cf-252</b>	solid, capsule, foil	1,79E+04	1,79E+04	9,98E-01	INH ACC(P)	Disposal (Effective, solid)
<b>Cf-253</b>	liquid, solid	2,46E+05	2,44E+05	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Cf-254</b>	liquid, solid	2,58E+03	2,56E+03	9,92E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Es-253</b>	liquid, solid	2,19E+05	2,17E+05	9,91E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)

Nuclide	Physikalische Form	Aktivitäten			Szenario bei Aktivitätsberechnung	
		FGRP65	FGBerechnet	FGRP65 / FGBerechnet	FG RP 65	Berechnet
<b>Es-254</b>	liquid, solid	2,88E+04	2,85E+04	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Es-254m</b>	liquid, solid	9,86E+05	9,88E+05	1,00E+00	EXT(W)	Normal Use (Effective, solid)
<b>Fm-254</b>	liquid, solid	14400000	1,43E+07	9,90E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)
<b>Fm-255</b>	liquid, solid	2960000	2,94E+06	9,92E-01	INH ACCF(W)	Accidental (Effective, liquid)

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)