



## A-5 Bestimmung des abgeleiteten Richtwertes der ODL für die Maßnahme „Evakuierung“

Die Bestimmung des abgeleiteten Richtwertes der ODL für die Maßnahme „Evakuierung“ lehnt sich eng an die Vorgehensweise der IAEA (IAEA 2017) für schwere Kernkraftwerksunfälle an und ist im Folgenden beschrieben.

Der Zusammenhang zwischen der Ortsdosisleistung und dem Richtwert der Dosis für die Maßnahme „Evakuierung“ wird wie folgt modelliert:

$$ODL(t, \text{mix}) = \left( \sum_i (RA_i(t, \text{mix}) \times H_{\text{Boden},i}^*) \right) \times WF \times UC \times DA_{\text{Boden}}(t, \text{mix}) \quad (\text{Gl. 4})$$

mit

$ODL(t, \text{mix})$  Ortsdosisleistung in 1 m Höhe über der kontaminierten Bodenoberfläche zum Zeitpunkt  $t$  für das jeweilige Nuklidgemisch („mix“) [ $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ]

$RA_i(t, \text{mix})$  Relative Aktivität von Radionuklid  $i$  in der Umwelt zum Zeitpunkt  $t$

$H_{\text{Boden},i}^*$  Ortsdosisleistung in 1 m Höhe für eine Einheits-Bodenkontamination des Radionuklids  $i$  [ $\text{Sv s}^{-1}/(\text{Bq m}^{-2})$ ]

$WF$  = 3; Gewichtungsfaktor (gemäß (IAEA 2017))

$UC$  =  $3,6 \cdot 10^9$  ( $\mu\text{Sv h}^{-1})/(\text{Sv s}^{-1})$ ; Konvertierungsfaktor

und

$$RA_i(t, \text{mix}) = \frac{A_i(t, \text{mix})}{\sum_j A_j(t, \text{mix})} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit

$RA_i(t, \text{mix})$  Relative Aktivität von Radionuklid  $i$  in der Umwelt zum Zeitpunkt  $t$

$A_i(t, \text{mix})$  Aktivität von Radionuklid  $i$  in der Umwelt zum Zeitpunkt  $t$  (diese wird bestimmt durch das vorhandene Inventar des Radionuklids und seines relativen – auf das Inventar bezogenen – Freisetzungsanteils in luftgetragener Form) [Bq]

und

$$DA_{\text{Boden}}(t, \text{mix}) = \min \{ A_{\text{Boden}, \text{Kleinkind}}(t, \text{mix}) ; A_{\text{Boden}, \text{Fetus}}(t, \text{mix}) \} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit

$DA_{\text{Boden}}(t, \text{mix})$  Abgeleitete Gesamt-Aktivität auf der Bodenoberfläche zum Zeitpunkt  $t$  für das jeweilige Nuklidgemisch [ $\text{Bq m}^{-2}$ ]

$A_{\text{Boden}, \text{Kleinkind}}(t, \text{mix})$  Gesamt-Aktivität auf der Bodenoberfläche zum Zeitpunkt  $t$  für das jeweilige Nuklidgemisch, die in der Dosis resultiert, die im Folgenden als Richtwert der Dosis für das Kleinkind aufgeführt ist [ $\text{Bq m}^{-2}$ ]



$A_{Boden,Fetus}(t, mix)$  Gesamt-Aktivität auf der Bodenoberfläche zum Zeitpunkt  $t$  für das jeweilige Nuklidgemisch, die in der Dosis resultiert, die im Folgenden als Richtwert der Dosis für den Fetus aufgeführt ist [ $Bq\ m^{-2}$ ]

und

$$A_{Boden,Kleinkind}(t, mix) = \frac{GC(Kleinkind)}{\sum_i (E_{Boden} \times RA_i(t, mix))} \quad (Gl. 7)$$

mit

$GC(Kleinkind)$  = 100 mSv; Richtwert der Dosis für das Kleinkind für die Maßnahme „Evakuierung“, effektive Dosis durch äußere Exposition in sieben Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide

$E_{Boden}(Kleinkind)$  Effektive Dosis für das Kleinkind durch Bodenstrahlung in sieben Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide und durch über unbeabsichtigte Ingestion aufgenommene Radionuklide pro Einheits-Bodenkontamination [ $Sv/(Bq\ m^{-2})$ ]

und

$$H_{Boden,i}^* = \dot{e}_{Boden,i}(Erwachsener) \times CorF_{Boden} \times SF_{e \rightarrow H^*} \quad (Gl. 8)$$

mit

$\dot{e}_{Boden,i}(Erwachsener)$  Effektive Dosisleistung für einen Erwachsenen durch eine unendlich ausgedehnte, ebene Oberflächenquelle mit Einheits-Kontamination für das Radionuklid  $i$  [ $(Sv\ s^{-1})/(Bq\ m^{-2})$ ]; die verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 24 in (IAEA 2017) dargestellt.

$CorF_{Boden}$  = 0,7; Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reduktion der Dosisleistung durch Bodenrauigkeit

$SF_{e \rightarrow H^*}$  = 1,4; Skalierungsfaktor zur Umrechnung der effektiven Dosis in Ortsdosis für die betrachteten Photonenergien

und

$$E_{Boden}(Kleinkind) = e_{Bodenstrahlung}(Kleinkind) + e_{Resuspension}(Kleinkind) + e_{unbeabsichtigte\ Ingestion}(Kleinkind)^3 \quad (Gl. 9)$$

mit

---

<sup>3</sup> Hinweis: Der Expositionspfad „Wolkenstrahlung durch resuspendierte Aktivität in der Luft“ wurde hier – aufgrund des vernachlässigbaren Beitrags zur Dosis – nicht berücksichtigt (im Gegensatz zum Ansatz der IAEA).



- $e_{\text{Bodenstrahlung}}$  effektive Dosis für das Kleinkind durch äußere Exposition durch Bodenstrahlung in sieben Tagen pro Einheits-Bodenkontamination [Sv/(Bq m<sup>-2</sup>)]
- $e_{\text{Resuspension}}$  effektive Folgedosis für ein Kleinkind durch in sieben Tagen inhalierete Radionuklide, die durch Resuspension in die bodennahe Luft eingebracht wurden, pro Einheits-Bodenkontamination [Sv/(Bq m<sup>-2</sup>)]
- $e_{\text{unbeabsichtigte Ingestion}}$  effektive Folgedosis für das Kleinkind durch interne Exposition durch über unbeabsichtigte Ingestion aufgenommen Radionuklide in sieben Tagen pro Einheits-Bodenkontamination [Sv/(Bq m<sup>-2</sup>)]

wobei

$$\begin{aligned} & e_{\text{Bodenstrahlung}}(\text{Kleinkind}) \\ &= \dot{e}_{\text{Boden},i}(\text{Erwachsener}) \times \text{CorF}_{\text{Boden}} \times \text{SF}_{\text{Erwachsener} \rightarrow \text{Kleinkind}} \times \text{WI}_{\text{Boden},i} \\ & \times (\text{F}_{\text{sf}} \times \text{F}_{\text{of}} + (1 - \text{F}_{\text{of}})) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 10})$$

mit

$\text{SF}_{\text{Erwachsener} \rightarrow \text{Kleinkind}}$  = 1,4; Skalierungsfaktor zur Umrechnung der effektiven Dosis eines Erwachsenen in die effektive Dosis eines Kleinkinds bei externer Exposition

$\text{WI}_{\text{Boden},i}$  Reduktions-Faktor für Bodenstrahlung, verursacht durch das Eindringen des Radionuklids  $i$  in tiefere Bodenschichten, zeitintegriert über sieben Tage [s]; die verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 17 in (IAEA 2017) dargestellt.

$\text{F}_{\text{sf}}$  = 0,4; Schutzfaktor für äußere Exposition (beschreibt die Verringerung der Dosisleistung innerhalb eines Gebäudes im Vergleich zu der Dosisleistung im Freien)

$\text{F}_{\text{of}}$  = 0,6; Anteil der Expositionszeit (von sieben Tagen), die die betrachtete Person innerhalb eines Gebäudes verbringt

und

$$e_{\text{Resuspension}}(\text{Kleinkind}) = e_{\text{Inhalation},i}(\text{Kleinkind}) \times \text{TI}_{\text{Boden} \rightarrow \text{Luft}} \times \text{F}_{\text{rf}} \times \text{Q}_{\text{Luft}} \quad (\text{Gl. 11})$$

mit

$e_{\text{Inhalation},i}$  effektive Folgedosis durch Inhalation des Radionuklids  $i$  pro aufgenommene Einheits-Aktivität [Sv Bq<sup>-1</sup>]; die verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 24 in (IAEA 2017) dargestellt.

$\text{TI}_{\text{Boden},i}$  Transfer-Faktor vom Boden in die Luft (durch Resuspension von Bodenmaterialien durch Wind und andere natürliche Prozesse) für das Radionuklid  $i$ , zeitintegriert über sieben Tage [s m<sup>-1</sup>]; die verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 17 in (IAEA 2017)



dargestellt, zur Diskussion dieser Zahlenwerte siehe auch Kapitel A-2.

$F_{\text{rf}}$  = 1,0; Anteil der luftgetragenen Radionuklide, der über die Lunge aufgenommen wird

$Q_{\text{Luft}}$  und  
= 0,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>; Atemrate für ein Kleinkind

$$e_{\text{unbeabsichtigte Ingestion}}(\text{Kleinkind}) = e_{\text{Ingestion},i}(\text{Kleinkind}) \times TI_{\text{Boden} \rightarrow \text{Verdauungstrakt},i} \quad (\text{Gl. 12})$$

mit

$e_{\text{Ingestion},i}$  effektive Folgedosis durch Ingestion des Radionuklids  $i$  pro aufgenommene Einheits-Aktivität [Sv Bq<sup>-1</sup>]; die verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 24 in (IAEA 2017) dargestellt.

$TI_{\text{Boden} \rightarrow \text{Verdauungstrakt},i}$  Transfer-Faktor vom Boden in den Verdauungstrakt (durch unbeabsichtigte Ingestion) für das Radionuklid  $i$ , zeitintegriert über sieben Tage [m<sup>2</sup>]; die verwendeten Zahlenwerte sind in Tab. 19 in (IAEA 2017) dargestellt, zur Diskussion dieser Zahlenwerte siehe auch Kapitel A-3.

Einen entscheidenden Einfluss auf den Zusammenhang zwischen der Ortsdosisleistung und dem Richtwert der Dosis – und damit auf die Bestimmung eines abgeleiteten Richtwerts für die Maßnahme „Evakuierung“ – hat das Nuklidgemisch, d. h. das Verhältnis zwischen den betrachteten Radionukliden in der Umwelt.

Bei der durch die IAEA vorgeschlagenen Vorgehensweise werden 19 verschiedene Nuklidgemische berücksichtigt (IAEA 2017), die sich für unterschiedliche Unfall- und Freisetzungsabläufe in verschiedenen Kernkraftwerks-Typen (Siedewasser- und Druckwasser-Reaktoren) mit unterschiedlichem Abbrand ergeben. Weiterhin wurde dort auch Unfallszenarien für Lagerbecken mit abgebrannten Brennelementen aus Kernkraftwerken sowie das Nuklidgemisch der bei dem Unfall in Fukushima Dai-ichi in die Umwelt freigesetzten radioaktiven Stoffe berücksichtigt.

Neben diesen von der IAEA vorgeschlagenen 19 verschiedenen Nuklidgemischen wurden durch die SSK weitere 9 Nuklidgemische berücksichtigt, die in der Vergangenheit in verschiedenen Forschungsvorhaben u. a. auf Basis probabilistischer Sicherheitsanalysen bestimmt wurden. Diese 9 Nuklidgemische werden als exemplarische Mischungen für Unfälle in deutschen Siedewasser- und Druckwasser-Reaktoren, in Forschungsreaktoren, für Unfälle beim Transport oder der Lagerung von radioaktiven Stoffen sowie für Unfälle mit Auswirkungen auf Brennelement-Lagerbecken angesehen.



*Tab. A-3: Exemplarische Nuklidgemische, die sich potenziell bei schweren Unfällen mit radioaktiven Stoffen in Deutschland ergeben können*

Radio-nuklid	FKA	FKI	FKH	FKF	FKE	FKKAZ1	FKKAZ2
-	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
Sr-90+	9E+14	4E+09	4E+09	4E+12	7E+13	3E+13	1E+14
Te-132+	1E+17	8E+12	8E+12	8E+15	1E+16	2E+16	3E+16
I-131	3E+17	3E+15	3E+15	2E+16	2E+17	4E+16	4E+16
Cs-134	3E+16	3E+11	3E+11	3E+14	1E+15	7E+15	8E+15
Cs-137+	3E+16	3E+11	3E+11	3E+14	9E+14	5E+15	5E+15
Pu-241	7E+13	8E+07	8E+07	8E+10	1E+11	7E+10	2E+12
Am-241	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Kr-88	2E+18	3E+15	3E+15	3E+15	6E+15	1E+17	1E+17
Xe-133	9E+15	5E+18	5E+18	5E+18	6E+18	4E+18	4E+18
Aerosole	2E+17	8E+12	8E+12	8E+15	2E+16	4E+16	5E+16
Iodisotope	6E+17	5E+15	5E+15	4E+16	4E+17	2E+17	2E+17
Edelgase	4E+18	6E+18	6E+18	6E+18	8E+18	6E+18	6E+18
Radio-nuklid	FKKBZ1	FKKBZ2					
-	[Bq]	[Bq]					
Sr-90+	1E+13	8E+14					
Te-132+	3E+15	2E+16					
I-131	1E+16	3E+16					
Cs-134	2E+15	3E+15					
Cs-137+	1E+15	2E+15					
Pu-241	3E+11	2E+14					
Am-241	0E+00	0E+00					
Kr-88	4E+16	2E+17					
Xe-133	1E+18	3E+18					
Aerosole	6E+15	5E+16					
Iodisotope	4E+16	9E+16					
Edelgase	1E+18	4E+18					

### Ergebnisse:

Für den oben beschriebenen Zusammenhang zwischen der Ortsdosisleistung und dem Richtwert der Dosis für die Maßnahme „Evakuierung“ ergeben sich die in Abbildung A-1 dargestellten Ergebnisse. Jede Kurve in dieser Abbildung beschreibt den Zeitverlauf der Ortsdosisleistung, die sich für eines der betrachteten Nuklidgemische ergibt, für verschiedene Zeitpunkte nach einer Freisetzung in die Umwelt. Die in den Kurven dargestellten Werte entsprechen jeweils der Ortsdosisleistung, die – für das jeweilige Nuklidgemisch und den jeweiligen Zeitpunkt – dem gewählten Richtwert der Dosis für die Maßnahme „Evakuierung“ entspricht. Die grün gefärbten Kurven stellen die Ergebnisse für die Nuklidgemische der IAEA

dar, die anders-farbigen Kurven die zusätzlichen speziell für deutsche Verhältnisse abgeleiteten Nuklidgemische.

Die in Abbildung A-1 zusätzlich dargestellte dicke schwarze horizontale Linie stellt den von der IAEA vorgeschlagenen abgeleiteten „Standard“-Richtwert von  $1000 \mu\text{Sv h}^{-1}$  für die Maßnahme „Evakuierung“ dar. Dieser Richtwert von  $1000 \mu\text{Sv h}^{-1}$  erscheint auch angesichts der Ergebnisse für die für deutsche Verhältnisse abgeleiteten Nuklidgemische sinnvoll. Nur für wenige Gemische und wenige Zeitbereiche wird der Wert von  $1000 \mu\text{Sv h}^{-1}$  unterschritten (d. h. in diesen Fällen könnte schon bei Dosisleistungen unter  $1000 \mu\text{Sv h}^{-1}$  der Richtwert der Dosis von  $100 \text{ mSv}$  überschritten werden). Angesichts der in der Modellierung teilweise angenommenen Konservativitäten erscheint die Unterschreitung, die maximal einen Faktor von 2 beträgt, als unbedenklich.

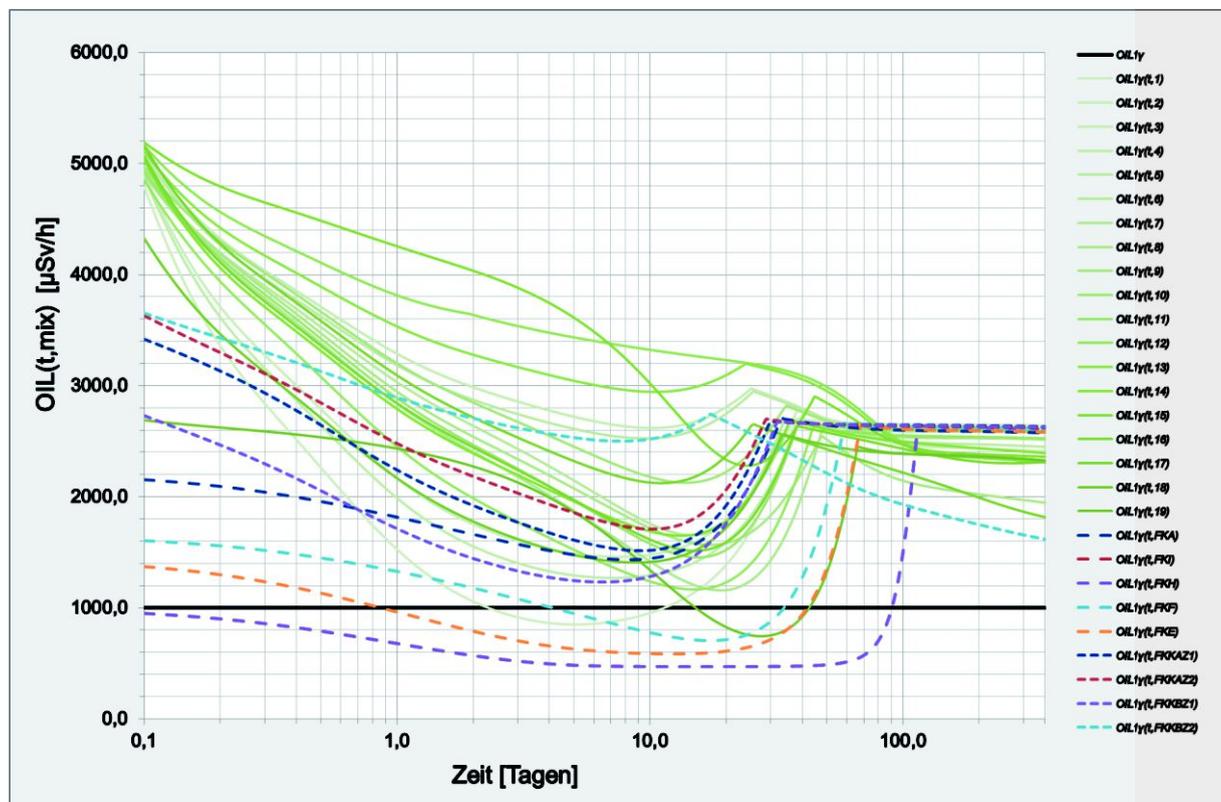
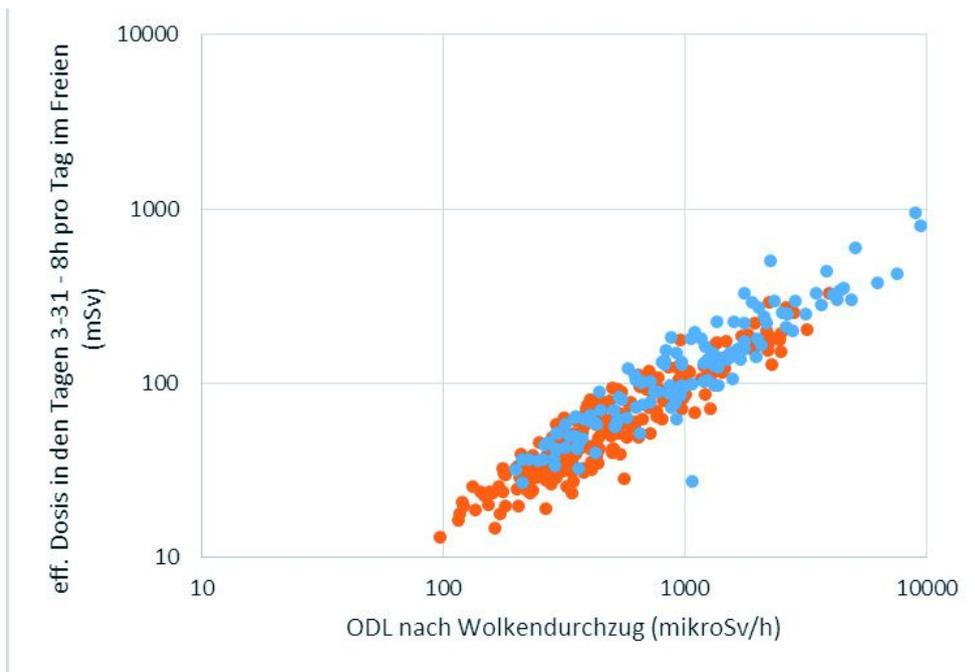


Abb. A-1: Zusammenhang zwischen der Ortsdosisleistung und dem Richtwert der Dosis für die Maßnahme „Evakuierung“ von  $100 \text{ mSv}$  über sieben Tage für verschiedene Nuklidgemische (Rechnungen des BfS, Größenordnung der Unsicherheiten bleibt derzeit unbestimmt, Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz)

Zur Bestätigung, dass bei Festlegung eines abgeleiteten Richtwerts von  $1000 \mu\text{Sv h}^{-1}$  für die Maßnahme „Evakuierung“ der Richtwert der Dosis von  $100 \text{ mSv}$  überschritten wird, wurden zusätzliche Rechnungen mit dem Entscheidungshilfesystem JRODOS durchgeführt. In Abbildung A-2 ist der Zusammenhang der Ortsdosisleistung nach Ende des Wolkendurchzugs und der Dosis durch externe Exposition in 30 Tagen (ab Ende des Wolkendurchzugs gerechnet) dargestellt (unter der Annahme von normalen Lebensgewohnheiten ähnlich der Annahmen in dem IAEA-Ansatz). Die Ergebnisse wurden aus 365 Einzelrechnungen abgeleitet, die die Wetterbedingungen an jedem einzelnen Tag eines repräsentativen Jahres widerspiegeln. Ortsdosisleistung und Dosis über 30 Tage wurden am maximalen Aufpunkt in der Entfernung von



5 km vom Freisetzungspunkt berechnet, zugrunde gelegt wurde eine Freisetzung gemäß dem Referenzquellterm „FKA“. Man erkennt, dass eine Ortsdosisleistung von  $1000 \mu\text{Sv h}^{-1}$  in den betrachteten 365 Fällen gleichbedeutend mit einer Dosis von 27 mSv bis 128 mSv (je nach Wettersituation) über 30 Tage ist, d. h. dass die resultierende Dosis über sieben Tage in allen Fällen deutlich unter 100 mSv liegt.



*Abb. A-2: Zusammenhang der Ortsdosisleistung nach Ende des Wolkendurchzugs und der effektiven Dosis durch externe Exposition in 30 Tagen (nach Ende des Wolkendurchzugs; blaue Punkte = überwiegend nasse Ablagerung; braune Punkte = überwiegend trockene Ablagerung) (Rechnungen des BfS, Größenordnung der Unsicherheiten bleibt derzeit unbestimmt, Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz)*