

## Anhang 15

### Berücksichtigung von radioaktiven Tochternukliden bei der Berechnung der Strahlenexposition

Radioaktive Tochternuklide können aus emittierten Radionukliden beim Transport in der Atmosphäre oder im Vorfluter und nach Ablagerung auf Pflanzen und Boden und im Sediment entstehen. Soweit die Beiträge dieser Tochternuklide zur Strahlungsexposition während der Betriebsphase relevant sind, werden sie i. a. in den entsprechenden Dosisfaktoren, z. B. für Beta- und Gammasubmersion und für Bodenstrahlung, berücksichtigt. Für langlebige Radionuklide mit Tochternukliden ist zu prüfen, ob nach Ende des Betriebes durch Aufbau der Aktivität der Tochternuklide im Boden auf folgenden Expositionspfaden relevante Strahlenexpositionen auftreten:

Luftpfad:

Gamma-Bodenstrahlung

Ingestion von Blattgemüse und anderen pflanzlichen Produkten,  
von Fleisch und  
von Milch

Wasserpfad:

Gamma-Bodenstrahlung auf Ufersedimenten, Überschwemmungsgebieten und Spülfeldern

Ingestion von Blattgemüse und anderen pflanzlichen Produkten,  
von Fleisch und  
von Milch,  
die von Gebieten stammen, die berechnet wurden

Ingestion von pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse, Blattgemüse, Fleisch und Milch,  
die auf Überschwemmungsgebieten erzeugt wurden.

Bei der Berechnung der flächenbezogenen Aktivität ist die Verlagerung der Radionuklide in tiefere Bodenschichten zu berücksichtigen. Hierdurch werden die Gleichungen, welche Bildung und Zerfall der Radionuklide einer Zerfallskette beschreiben, modifiziert:

$$\frac{dB_k(t)}{dt} = \dot{Q}_k + \lambda_k \cdot a_{k-1,k} \cdot B_{k-1}(t) - (\lambda_k + \lambda_{v,k}) \cdot B_k(t) \quad (15.1)$$

Hier bedeuten:

$B_k(t)$ : Flächenbezogene Aktivität des k-ten Radionuklids in der Zerfallskette in  $Bq \cdot m^{-2}$

$a_{k-1,k}$ : Anteil der Zerfälle des Radionuklids k-1, die zum Radionuklid k führen

$\dot{Q}_k$ : Flächenbezogene Aktivitätsdepositionsrate des k-ten Radionuklids in der Zerfallskette in  $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

(=  $\dot{Q}_{B,k}$  für Fallout und Washout; =  $\dot{Q}_{W,k}$  für Beregnung; =  $\dot{Q}_{Ü,k}$  für Überschwemmungsgebiete)

$\lambda_k$ : Zerfallskonstante des k-ten Radionuklids in der Zerfallskette in  $s^{-1}$

$\lambda_{v,k}$ : Verweilkonstante des k-ten Radionuklids in der Zerfallskette in der obersten Bodenschicht in  $s^{-1}$

$\lambda_{v,k} = \lambda_{M,k}$  außer bei Überschwemmungsgebieten; dort ist  $\lambda_{v,k} = \lambda_{Ü}$

k: Index zur Bezeichnung der Radionuklide innerhalb der Zerfallskette. Es ist

$k = 1$  für das Mutternuklid

$k = 2,3,4\dots$  für das 1., 2., 3. ... Tochternuklid.

Bei der Berechnung der flächenbezogenen Aktivität des  $k$ -ten Radionuklids sind die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase zu unterscheiden. Die Zeit  $t$  in der Betriebsphase beginnt mit dem Betrieb der kerntechnischen Anlage. Die Zeit  $t$  in der Nachbetriebsphase beginnt mit dem Ende der Betriebsphase von 50 Jahren.

Für die Betriebsphase ist die flächenbezogene Aktivitätsdepositionsrate

durch Washout und Fallout

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{B,k} &= A_k \cdot (\bar{F}_k^G + \bar{W}_k^G) \cdot a_p && \text{für } k = 1 \\ \dot{Q}_{B,k} &= 0 && \text{für } k \neq 1\end{aligned}\quad (15.2)$$

durch Beregnung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{W,k} &= \frac{W \cdot C_k^{\text{Fließ}} \cdot t_R}{365} && \text{für } k = 1 \\ \dot{Q}_{W,k} &= 0 && \text{für } k \neq 1\end{aligned}\quad (15.3)$$

und durch Überschwemmung

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Ü,k} &= K_e^k \cdot C_k^{\text{Fließ}} \cdot \ln 2 && \text{für } k = 1 \\ \dot{Q}_{Ü,k} &= 0 && \text{für } k \neq 1\end{aligned}\quad (15.4)$$

Die flächenbezogene Aktivität  $B_k(t)$  am Ende der Betriebszeit ist nach der Gleichung (15.1) für die Zeit  $t = 50$  Jahre mit den Anfangsbedingungen  $B_k(0) = 0$  und mit  $\dot{Q}_{B,k}$  nach Gleichung (15.2),  $\dot{Q}_{W,k}$  nach Gleichung (15.3) bzw.  $\dot{Q}_{Ü,k}$  nach Gleichung (15.4) zu berechnen.

Für die Nachbetriebsphase sind die flächenbezogenen Aktivitätsdepositionsraten durch Washout und Fallout, durch Beregnung und durch Überschwemmung

$$\dot{Q}_{B,k} = 0 \text{ für alle } k \quad (15.5)$$

$$\dot{Q}_{W,k} = 0 \text{ für alle } k \quad (15.6)$$

$$\dot{Q}_{Ü,k} = 0 \text{ für alle } k \quad (15.7)$$

Die flächenbezogene Aktivität  $B_k(t)$  zur Zeit  $t$  in der Nachbetriebsphase ergibt sich nach der Gleichung (15.1) mit  $B_k(t = 0)$  in der Nachbetriebsphase gleich  $B_k(t = 50 \text{ a})$  in der Betriebsphase, sowie mit  $\dot{Q}_k$  nach Gleichung (15.5), (15.6) bzw. (15.7).

Wegen der Indizierung und Zuordnung der flächenbezogenen Aktivitätsdepositionsraten sind alle Radionuklide, die im Emissionsspektrum der kerntechnischen Anlage oder Einrichtung vorkommen, als Mutternuklid ( $k = 1$ ) zu betrachten, unabhängig davon, ob sie auch in anderen Zerfallsketten vorkommen.

Die flächenbezogene Aktivität ist den Berechnungen der Strahlenexposition auf den verschiedenen Expositionspfaden zugrunde zu legen.

Durch Tochternuklide ergibt sich in der Nachbetriebsphase eine Strahlenexposition durch Bodenstrahlung und Ingestion:

Die Jahresdosis durch Bodenstrahlung im Organ oder Gewebe T durch das Tochternuklid k ist entsprechend Gleichung (3.6)

$$H_{T,b,k} = B_k(t) \cdot g_{b,k,T} \cdot t_A \quad (15.8)$$

Neben den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$g_{b,k,T}$ : Dosisleistungsfaktor für das Organ oder Gewebe T durch Bodenstrahlung des Radionuklids k ohne Tochternuklide in  $\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , siehe Anhang 2

$t_A$ : Aufenthaltsdauer pro Jahr in s

Wie bei der Berechnung der Jahresdosis durch äußere Bestrahlung beim Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten entfällt die explizite Korrektur für die Bodenrauhigkeit und das Eindringen in tiefere Bodenschichten (siehe Kapitel 5.4.2).

Die Jahresdosis durch Ingestion im Organ oder Gewebe T durch das Tochternuklid k ergibt sich in der Nachbetriebsphase wie in der Betriebsphase nach Gleichung (3.10). Die spezifische Aktivität  $C_k^n$  des Tochternuklids k in den pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse ( $n = \text{Pf}$ ), in Blattgemüse ( $n = \text{Bl}$ ) und in Weidepflanzen ( $n = \text{Wd}$ ) berechnet sich zu:

$$C_k^n = B_k(t) \cdot \frac{T_k^n}{P^m} \quad (15.9)$$

Neben den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$T_k^n$ : Transferfaktor vom Boden zur Pflanze ( $n = \text{Pf}$  bzw.  $n = \text{Wd}$ ) für das Tochternuklid k in  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  Pflanzen-Feuchtmasse pro  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  Boden-Trockenmasse, siehe Anhang 6

Die spezifische Aktivität in der Milch kann nach Gleichung (3.14), im Futter nach Gleichung (3.15) und im Fleisch nach Gleichung (3.16) berechnet werden.

Für Spülfelder ist die spezifische Aktivität von Mutter- und Tochternukliden zu betrachten. Die flächenbezogene Aktivität  $B_G(t)$  des Radionuklids k ist durch die spezifische Aktivität  $C_k(t)$  zu ersetzen.

Es ist ausreichend, eine einmalige Aufbringung von Sediment wie in Kapitel 5.4.3 zu betrachten. Die mittlere Anfangsaktivität

$\bar{C}_k^{\text{Se}}(t)$  berechnet sich wie folgt:

$$\bar{C}_k^{\text{Se}}(t) = C_k^{\text{Se}}(0) \cdot \exp(-\lambda_k \cdot t) \quad (15.10)$$

mit

$C_k^{\text{Se}}(0)$ : Spezifische Aktivität des Radionuklids k im Sediment zu Beginn des Ausbaggerns in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

Die spezifische Aktivität erhält man nach der Gleichung (15.1), in der statt der flächenbezogenen Aktivität die spezifische Aktivität und statt der flächenbezogenen Aktivitätsdepositionsrate die Quellstärke der spezifischen Aktivität einzuführen ist.

Die Jahresdosis  $H_{T,sp,k}$  im Organ oder Gewebe T durch das Tochternuklid k bei Aufenthalt auf Spülfeldern ist

$$H_{T,sp,k} = \bar{C}_k^{\text{Se}} \cdot \rho_{sp} \cdot g_{b,k,T} \cdot t_A \cdot U_k \quad (15.11)$$

Bei zeitabhängigen Dosisberechnungen für die Nachbetriebsphase sind im Einzelfall gleichwertige vereinfachende Näherungslösungen bei der Berechnung zulässig. Eine solche Vereinfachung ist z. B. die Annahme, daß jedes Tochternuklid mit der gleichen Aktivität vorliegt, wie das Mutternuklid am Ende der Betriebsphase, und daß alle Tochternuklide mit dieser Aktivität gleichzeitig zur Strahlenexposition beitragen.

**BAnz Nr. 64a vom 31. März 1990**

In Absprache mit dem BfS – und unter dessen freundlicher Mitwirkung – sind bei der Erstellung der vorliegenden Fassung eine Reihe von Druckfehlerkorrekturen, insbesondere bei den Gleichungen, gegenüber der im BAnz und dem RS-Handbuch veröffentlichten Fassung vorgenommen worden.