Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen)

vom 28. August 2012 (BAnz AT 05.09.2012 B1)

Nach Artikel 85 Absatz 2 Satz 1 des Grundgesetzes in Verbindung mit § 47 Absatz 2 der Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist, erlässt die Bundesregierung folgende allgemeine Verwaltungsvorschrift:

Inhaltsübersicht

1 Anwendungsbereich

2 Ziele und Grundsätze zur Ermittlung der Strahlenexposition

3 Strahlenexposition bei der Ableitung mit Luft
3.1 Expositionspfade und ungünstigste Einwirkungsstellen
3.2 Berechnung der äußeren Strahlenexposition
3.2.1 Strahlenexposition durch Betastrahlung innerhalb der Abluftfahne (Betasubmersion)
3.2.2 Strahlenexposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammasubmersion)
3.2.3 Strahlenexposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (Bodenstrahlung)
3.3 Berechnung der inneren Strahlenexposition
3.3.1 Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)
3.3.2 Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch (Ingestion)

4 Ausbreitung radioaktiver Stoffe und Umgebungskontamination
4.1 Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre
4.1.1 Grundgleichung
4.1.2 Kurzzeitausbreitungsfaktor
4.1.3 Langzeitausbreitungsfaktor
4.1.4 Vereinfachte Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors
4.2 Ablagerung radioaktiver Stoffe
4.2.1 Trockene Ablagerung (Fallout)
4.2.1.1 Standortspezifisches Verfahren
4.2.1.2 Vereinfachtes Verfahren
4.2.2 Ablagerung durch Niederschlag (Washout)
4.2.2.1 Standortspezifisches Verfahren
4.2.2.2 Vereinfachtes Verfahren
4.2.3 Abreicherungsfaktoren
4.3 Ausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion
4.3.1 Kurzzeitausbreitungsfaktor
4.3.1.1 Standortspezifisches Verfahren
4.3.1.2 Vereinfachtes Verfahren
4.3.2 Langzeitausbreitungsfaktor
4.3.2.1 Standortspezifisches Verfahren
4.3.2.2 Vereinfachtes Verfahren
4.4 Ungleichmäßige Emissionen
4.4.1 Anwendung von Langzeitausbreitungsfaktoren
4.4.2 Anwendung von Kurzzeitausbreitungsfaktoren
4.5 Meteorologische Daten
4.5.1 Ausbreitungsparameter σ_y und σ_z
4.5.2 Ausbreitungsstatistik
4.5.3 Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe
4.6 Örtliche Besonderheiten
4.6.1 Kaminüberhöhung
4.6.2 Gebäudeeinfluss
4.6.3 Kühlturmeinfluss
4.6.4 Orographie

5 Strahlenexposition bei der Ableitung mit Wasser
5.1 Expositionspfade
5.2 Anwendungsbereich der Rechenmodelle
5.3 Ausbreitung radioaktiver Stoffe in Fließgewässern
5.4 Berechnung der äußeren Strahlenexposition
5.4.1 Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Ufersediment
5.4.2 Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten
5.4.3 Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Spülfeldern
5.5 Berechnung der inneren Strahlenexposition
5.5.1 Aktivität in Trinkwasser
5.5.2 Aktivität in Fischfleisch
5.5.3 Aktivitätsberechnung für die Expositionspfade „Viehtränke“
5.5.4 Aktivitätsberechnung für die Expositionspfade „Beregnung“
5.5.5 Aktivitätsberechnung für die Expositionspfade „Landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten“
5.6 Landwirtschaftliche Nutzung von Fluss- und Klärschlamm

6 Inkrafttreten

Anhang 1 Dosisleistungskoeffizienten für Betasubmersion $g_{\gamma,r,T}$ ($Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$)

Anhang 2 Dosisleistungskoeffizienten für Gammasubmersion $g_{\gamma,r,T}$ ($Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$) und für Bodenstrahlung $g_{b,r,T}$ ($Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$) und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammasubmersion und Bodenstrahlung

Anhang 3 Inhalationsdosiskoeffizienten $g_{h,r,T}$ ($Sv \cdot Bq^{-1}$) und Ingestionsdosiskoeffizienten $g_{g,r,T}$ ($Sv \cdot Bq^{-1}$)

Anhang 4 Werte zur Berechnung des Radionuklidtransports über den Ingestionspfad und den Sedimentpfad

Anhang 5 Lebensgewohnheiten der Referenzperson

Anhang 6
Tabelle 1 Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes
Tabelle 2 Transferfaktoren zur Berechnung des Übergangs inkorporierter Radionuklide in die Muttermilch

Anhang 7
Tabelle 1 Ausbreitungskoeffizienten p_y und p_z und Ausbreitungsexponenten q_y und q_z in Abhängigkeit von Diffusionskategorie und Emissionshöhe
Tabelle 2 Exponent m_j des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils und maximale vertikale Ausbreitungsparameter in m
Tabelle 3 Proportionalitätsfaktoren für Fallout v_g und für Washout c sowie Washoutkoeffizienten Λ_0
Tabelle 4 Koeffizienten $b_{1,m}$ zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1 MeV
Tabelle 5 Koeffizienten $a_{k,m}$ zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion

Anhang 8 Diagramm zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors

Anhang 9 Diagramme zur vereinfachten Ermittlung des Kurzzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion

Anhang 10 Diagramm zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion

Anhang 11 Radionuklidgemische für Ableitungen mit Luft

Anhang 12 Radionuklidgemische für Ableitungen mit Wasser

Anhang 13 Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch

Anhang 14 Halbwertszeiten für die Anlagerung an Schwebstoffen und Übergangskonstanten

Anhang 15 Berücksichtigung von radioaktiven Tochternukliden bei der Berechnung der Strahlenexposition

1 Anwendungsbereich

Diese allgemeine Verwaltungsvorschrift gilt für die Ermittlung der Strahlenexposition nach § 47 Absatz 2 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). Die Ergebnisse dienen der Feststellung im Genehmigungsverfahren, ob die Strahlenschutzverantwortlichen die technische Auslegung und den Betrieb ihrer Anlagen oder Einrichtungen so geplant haben, dass die durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder mit Wasser bedingte Strahlenexposition die Dosisgrenzwerte des § 47 Absatz 1 der StrlSchV nicht überschreitet.

2 Ziele und Grundsätze zur Ermittlung der Strahlenexposition

2.1 Ziel dieser allgemeinen Verwaltungsvorschrift ist es, die Modelle und Parameter zur Berechnung der Strahlenexposition so festzulegen, dass bei ihrer Anwendung die zu erwartende Strahlenexposition des Menschen nicht unterschätzt wird.

2.2 Die Strahlenexposition ist für die Referenzpersonen der in der Anlage VII Teil B Tabelle 1 StrlSchV aufgeführten Altersgruppen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen zu ermitteln. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage oder Einrichtung, an denen aufgrund der Verteilung der abgeleiteten radioaktiven Stoffe in der Umwelt durch Aufenthalt oder durch Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist. Zu berücksichtigen sind dabei reale Nutzungsmöglichkeiten [1]). Für die Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser sind der Nahbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe ≤ 10 Stunden) und der Fernbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe > 5 Tage) zu betrachten.

Bei kleinen Vorflutern ist zusätzlich der Mündungsbereich in den größeren Vorfluter zu betrachten. Falls dieser Bereich nicht zum Nah- oder Fernbereich gezählt werden kann, ist die Zeitabhängigkeit der Anlagerung an Schwebstoffe zu berücksichtigen.

2.3 Für die Referenzperson sind die effektive Dosis und die Organdosen im Kalenderjahr (Jahresdosis) zu berechnen.[2])

2.4 Die Jahresdosis ist als Summe der Dosen zu berechnen, die durch äußere und innere Strahlenexposition aufgrund radioaktiver Ableitungen mit der Abluft oder dem Abwasser entstehen. Dabei sind Beiträge nach § 47 Absatz 5 StrlSchV zu berücksichtigen.

Zur Ermittlung der Vorbelastung gemäß § 47 Absatz 5 StrlSchV durch Anlagen oder Einrichtungen, die einer Genehmigung nach den §§ 6, 7 oder 9 des Atomgesetzes (AtG) oder nach § 7 StrlSchV oder eines Planfeststellungsbeschlusses nach § 9b AtG bedürfen, ist von den durch Genehmigungen festgesetzten höchstzulässigen Emissionen auszugehen. Demgegenüber sind bei Anlagen mit einer Genehmigung nach den §§ 7 oder 11 StrlSchV, für die keine Aktivitätsmengen und Aktivitätskonzentrationen zur Ableitung durch die Behörde festgelegt wurden und deren Betreiber zur Einhaltung der in Anlage VII Teil D der StrlSchV genannten Emissionswerte

[1]) Unter Einbeziehung auch möglicher künftiger Änderungen der Besiedelung oder künftiger Nutzung, soweit diese nicht prinzipiell aufgrund der ökologischen Verhältnisse während der Standzeit der Anlage oder Einrichtung außer Betracht bleiben müssen.

[2]) Für Ableitungen mit Radionuklidgemischen ist es zulässig, die effektive Dosis mit den einzelnen radionuklidspezifischen **Effektivdosiskoeffizienten** zu berechnen.

verpflichtet sind, Erfahrungswerte oder realistische Planungswerte für die Ableitung von radioaktiven Stoffen zugrunde zu legen.

Bei äußerer Strahlenexposition ist die Dosis für das Bezugsjahr zu berechnen. Bei innerer Strahlenexposition ist die Folgedosis bis zum 70. Lebensjahr der Referenzperson aufgrund der Inkorporation im Bezugsjahr zu berechnen. Bei Expositionspfaden, die mit einer Anreicherung in der Umwelt verbunden sind, ist eine 50-jährige Akkumulationszeit vor dem Bezugsjahr zu berücksichtigen.

2.5 Die in Anlage VII Teil A StrlSchV festgelegten Expositionspfade sind in der Regel in die Berechnung einzubeziehen. Nach Anlage VII Teil A gilt: „Expositionspfade bleiben unberücksichtigt oder zusätzliche Expositionspfade sind zu berücksichtigen, wenn dies auf Grund der örtlichen Besonderheiten des Standortes oder auf Grund der Art der Anlage oder Einrichtung begründet ist."

3 Strahlenexposition bei der Ableitung mit Luft

3.1 Expositionspfade und ungünstigste Einwirkungsstellen

Bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft sind folgende Expositionspfade zu berücksichtigen:

Zur Ermittlung der äußeren Strahlenexposition:

1. Exposition durch Betastrahlung innerhalb der Abluftfahne (Betasubmersion)
2. Exposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammasubmersion)
3. Exposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (Bodenstrahlung)

Zur Ermittlung der inneren Strahlenexposition:

4. Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)
5. Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung (Ingestion) auf dem Weg

   5.1. Luft – Pflanze
   5.2. Luft – Futterpflanze – Kuh – Milch
   5.3. Luft – Futterpflanze – Tier – Fleisch
   5.4. Luft – Muttermilch
   5.5. Luft – Nahrung – Muttermilch

Bei der Berechnung der Strahlenexposition ist wie folgt zu verfahren:

Unter Berücksichtigung realer Nutzungsmöglichkeiten sind die Stellen mit der höchsten effektiven Dosis oder mit den höchsten Organdosen zugrunde zu legen. Dabei ist jeweils für die Dosis aus äußerer Strahlenexposition und Inhalation die Stelle auszuwählen, an der die Summe dieser beiden Dosen am höchsten ist. Zusätzlich sind die Ingestionsdosen zu berücksichtigen, die sich aus dem Verzehr von Lebensmitteln entsprechend den Ernährungsgewohnheiten der Anlage VII Teil B Tabelle 1 StrlSchV ergeben. Dabei ist als Erzeugungsort der Lebensmittel jeder Lebensmittelgruppe jeweils die Stelle mit den höchsten Organdosen oder mit der höchsten effektiven Dosis, die sich aus dem Verzehr dieser Lebensmittelgruppe ergibt, auszuwählen.

3.2 Berechnung der äußeren Strahlenexposition

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition durch das Radionuklid r ergibt sich aus der Summe der Jahresdosen durch Gammasubmersion und Bodenstrahlung und im Falle der Haut zusätzlich durch Betasubmersion.

Für alle Organe oder Gewebe T ist:

$$H_{T,a,r} = H_{T,\beta,r} + H_{T,\gamma,r} + H_{T,b,r} \qquad (3.1)$$

Hierin bedeuten:

$H_{T,a,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition über den Abluftpfad durch das Radionuklid r in Sv

$H_{T,\beta,r}$: Jahresdosis in 0,07 mm Hauttiefe durch Betasubmersion durch das Radionuklid r in Sv, für alle anderen Organe ist $H_{T,\gamma,r} = 0$ zu setzen.

$H_{T,\gamma,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch Gammasubmersion durch das Radionuklid r in Sv

$H_{T,b,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch Bodenstrahlung bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft durch das Radionuklid r in Sv

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft ergibt sich zu:

$$H_{T,a} = \sum_r H_{T,a,r} \qquad (3.2)$$

Die Berechnung der drei Anteile an der Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft durch das Radionuklid r ist wie folgt durchzuführen:

3.2.1 Strahlenexposition durch Betastrahlung innerhalb der Abluftfahne (Betasubmersion)

Die Strahlenexposition durch Betasubmersion ist der Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in der Luft am betrachteten Ort direkt proportional.

$$H_{T,\beta,r} = A_r \cdot \bar{\chi}^G \cdot g_{\beta,r,T} \qquad (3.3)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

A_r : Jährliche Ableitungsmenge des Radionuklids r in Bq

$\bar{\chi}^G$: Langzeitausbreitungsfaktor für das gesamte Jahr am betrachteten Ort in $s \cdot m^{-3}$, siehe Kapitel 4.1.3

$g_{\beta,r,T}$: Dosisleistungskoeffizient für die Haut in 0,07 mm Tiefe durch Betasubmersion des Radionuklids r in ($Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$), siehe Anhang 1, für alle anderen Organe ist $g_{\beta,r,T} = 0$ zu setzen.

Bilden sich während des Transports in der Atmosphäre Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklides mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

3.2.2 Strahlenexposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammasubmersion)

Bei der Berechnung der Strahlenexposition durch Gammastrahlen sind wegen der großen Reichweite der Gamma-Quanten die Beiträge aus der gesamten Abluftfahne zu berücksichtigen. Es ist über alle Volumenelemente der Abluftfahne zu integrieren. Zu berücksichtigen sind die Absorption und Streuung der Gamma-Quanten

durch Luft, durch Erdboden und im Menschen. Beim Zerfall der Radionuklide werden Gamma-Quanten verschiedener Energie emittiert. Der Dosisberechnung sind zwei Energiegruppen, unterhalb und oberhalb von 0,2 MeV, zugrunde zu legen. Damit ergibt sich:

$$\mathbf{H_{T,\gamma,r}} = \mathbf{A_r} \cdot \mathbf{g_{\gamma,r,T}} \cdot \left(\mathbf{f_r} \cdot \overline{\chi}^{\boldsymbol{G}}_{\boldsymbol{\gamma 1}} \cdot \mathbf{c_{Geo,\gamma 1}} + (\mathbf{1} - \mathbf{f_r}) \cdot \overline{\chi}^{\boldsymbol{G}}_{\boldsymbol{\gamma 2}} \cdot \mathbf{c_{Geo,\gamma 2}}\right) \quad (3.4)$$

Es ist zulässig, die Ausbreitungsfaktoren für die Gamma-Energien unter 0,2 MeV durch den Ausbreitungsfaktor für 0,1 MeV und für die höheren Gamma-Energien durch den Ausbreitungsfaktor für 1 MeV zu beschreiben.

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\overline{\chi}^{G}_{\gamma 1}$: Langzeitausbreitungsfaktor für das gesamte Jahr für Gammasubmersion in s · m^{-2} für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, siehe Kapitel 4.3.2

$\overline{\chi}^{G}_{\gamma 2}$: Langzeitausbreitungsfaktor für das gesamte Jahr für Gammasubmersion in s · m^{-2} für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV

$g_{\gamma,r,T}$: Dosisleistungskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Gammasubmersion des Radionuklids r in (Sv · m^2 · Bq^{-1} · s^{-1}), siehe Anhang 2

f_r : Anteil des Gamma-Energieemissionsspektrums des Radionuklids r oberhalb der Energie 0,2 MeV, siehe Anhang 2

$$f_r = \frac{\sum_{E_i > 0{,}2\ \mathrm{MeV}} Y_i \cdot E_i}{\sum_i Y_i \cdot E_i}$$

mit

E_i = gamma-Energie in MeV

Y_i = pro Zerfall emittierte Gamma-Quanten der Energie E_i

$c_{Geo,\gamma 1}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson bei Gammasubmersion für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, siehe Anhang 2

$c_{Geo,\gamma 2}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson bei Gammasubmersion für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV, siehe Anhang 2

Folgende Vereinfachung für die Ausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion ist zulässig:

$$\overline{\chi}^{G}_{\gamma 2} = 2 \cdot \overline{\chi}^{G}_{\gamma 1}$$

Damit vereinfacht sich die Gleichung zur Berechnung der Jahresdosis zu

$$\mathbf{H_{T,\gamma,r}} = \mathbf{A_r} \cdot \mathbf{g_{\gamma,r,T}} \cdot \overline{\chi}^{\boldsymbol{G}}_{\boldsymbol{\gamma 1}} \left(\mathbf{f_r} \cdot \mathbf{c_{Geo,\gamma 1}} + \mathbf{2} \cdot (\mathbf{1} - \mathbf{f_r}) \cdot \mathbf{c_{Geo,\gamma 2}}\right) \quad (3.5)$$

Bilden sich während des Transports in der Atmosphäre Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklids mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

3.2.3 Strahlenexposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (Bodenstrahlung)

Wie bei der Strahlenexposition durch Gammasubmersion können Gammastrahlen, die von am Boden abgelagerten Radionukliden ausgesandt werden, aus einem Umkreis von bis zu einigen hundert Metern zur äußeren Strahlenexposition beitragen. In diesem Umkreis ist von der gleichen abgelagerten Aktivität wie am betrachteten Ort auszugehen. Die Jahresdosis errechnet sich nach

$$\mathbf{H_{T,b,r}} = \mathbf{A_r} \cdot \left(\overline{\mathbf{F}}^{\mathbf{G}}_{\mathbf{r}} + \overline{\mathbf{W}}^{\mathbf{G}}_{\mathbf{r}}\right) \cdot \mathbf{K_{b,r}} \cdot \mathbf{g_{b,r,T}} \cdot \mathbf{b} \cdot \left(\mathbf{f_r} \cdot \mathbf{c_{Geo,b1}} + (\mathbf{1} - \mathbf{f_r}) \cdot \mathbf{c_{Geo,b2}}\right) \quad (3.6)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\overline{F}^{G}_{r}$: Langzeitfalloutfaktor für das gesamte Jahr in m^{-2}, siehe Kapitel 4.2.1

$\overline{W}^{G}_{r}$: Langzeitwashoutfaktor für das gesamte Jahr in m^{-2}, siehe Kapitel 4.2.2

$K_{b,r}$: Effektive Ablagerungszeit für das Radionuklid r in s

$K_{b,r} = (1 - \exp(-\lambda_r \cdot t_b)) / \lambda_r$

λ_r : Physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r in s^{-1}

t_b : Zeitraum, innerhalb dessen das Radionuklid r auf dem Boden abgelagert wird in s, siehe Anhang 4

$g_{b,r,T}$: Dosisleistungskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Bodenstrahlung des Radionuklids r in (Sv · m^2 · Bq^{-1} · s^{-1}), siehe Anhang 2

b : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Bodenrauigkeit und des Eindringens in tiefere Bodenschichten; es ist b = 0,5 zu setzen

$c_{Geo,b1}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, siehe Anhang 2

$c_{Geo,b2}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV, siehe Anhang 2

Bilden sich während der Betriebsphase der Anlage nach der Ablagerung radioaktiver Stoffe auf dem Boden Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklids mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

3.3 Berechnung der inneren Strahlenexposition

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft durch das Radionuklid r ergibt sich aus der Summe der Jahresdosen durch Inhalation und durch Ingestion.

Es ist:

$$H_{T,i,r} = H_{T,h,r} + H_{T,g,r} \quad (3.7)$$

Hierin bedeuten:

$H_{T,i,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft durch das Radionuklid r in Sv

$H_{T,h,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch Inhalation des Radionuklids r in Sv

$H_{T,g,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r in Sv

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft ergibt sich zu

$$H_{T,i} = \sum_r H_{T,i,r} \qquad (3.8)$$

Die Berechnung der beiden Anteile an der Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch das Radionuklid r ist wie folgt durchzuführen:

3.3.1 Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)

Die Strahlenexposition durch Inhalation des Radionuklids r ist proportional der am betrachteten Ort inhalierten Aktivität. Die Jahresdosis ist:

$$H_{T,h,r} = A_r \cdot \bar{\chi}^G \cdot \dot{V} \cdot g_{h,r,T} \qquad (3.9)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\dot{V}$: Atemrate in $m^3 \cdot s^{-1}$, siehe Anhang 5

$g_{h,r,T}$: Dosiskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Inhalation des Radionuklids r in $Sv \cdot Bq^{-1}$, siehe Anhang 3

Tochternuklide, die während der Transportzeit von der Quelle bis zum Aufenthaltsort der Referenzperson gebildet werden, können bei der Berechnung der Jahresdosen durch Inhalation unberücksichtigt bleiben.

3.3.2 Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch (Ingestion)

Die Strahlenexposition durch Ingestion ergibt sich durch die mit Lebensmitteln und Muttermilch aufgenommene Aktivität.

Für die Annahmen über die Ernährungsgewohnheiten der Referenzperson gilt Anhang 5.

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T (ohne Berücksichtigung von Dekontaminationseffekten bei der Zubereitung in der Lebensmitteltechnologie und im Haushalt) ist für die Referenzperson in allen Altersgruppen > 1 a:

$$\mathbf{H_{T,g,r} = \left(U^{Pf} \cdot C_r^{Pf} + U^{Bl} \cdot C_r^{Bl} + U^{Mi} \cdot C_r^{Mi} + U^{Fl} \cdot C_r^{Fl}\right) \cdot g_{g,r,T}} \qquad (3.10)$$

Hierin bedeuten:

$H_{T,g,r}$: Jahresdosis im Organ oder im Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r in Sv

U^{Pf} : Jährliche Verzehrmenge an pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse in kg, siehe Anhang 5

U^{Bl} : Jährliche Verzehrmenge an Blattgemüse in kg, siehe Anhang 5

U^{Mi} : Jährliche Verzehrmenge an Milch und Milchprodukten in kg, siehe Anhang 5

U^{Fl} : Jährliche Verzehrmenge an Fleisch und Fleischwaren in kg, siehe Anhang 5

C_r^{Pf} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichungen (3.11) bis (3.13)

C_r^{Bl} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Blattgemüse in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichungen (3.11) bis (3.13)

C_r^{Mi} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Milch und Milchprodukten in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichung (3.14)

C_r^{Fl} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fleisch und Fleischwaren in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichung (3.16)

$g_{g,r,T}$: Dosiskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r in $Sv \cdot Bq^{-1}$, siehe Anhang 3

Für die Referenzperson in der Altersgruppe ≤ 1 a ist der Verzehr von Beikost und die Aufnahme von Muttermilch bzw. Säuglingsmilch zu berücksichtigen. Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T (ohne Berücksichtigung von Dekontaminationseffekten bei der Zubereitung in der Lebensmitteltechnologie und im Haushalt) ist für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 a:

$$\mathbf{H_{T,g,r} = \Big[U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot C_r^{Pf} + U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot C_r^{Bl} + U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot C_r^{Mi} + U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot C_r^{Fl} + \frac{1}{365 \cdot a_d} \cdot \left(A_r^{g;1a} \cdot T_r^{MM,g} + A_r^{h;1a} \cdot T_r^{MM,h}\right) \cdot U^{MM}\Big] \cdot g_{g,r,t}} \qquad (3.10a)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

a_d : Zeitraum eines Tages; $a_d = 1\ d$

$A_r^{g;1a}$: Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommen wird, siehe Gleichung (3.10b)

$A_r^{h;1a}$: Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der Mutter durch Inhalation aufgenommen wird, siehe Gleichung (3.10c)

$T_r^{MM,g}$: Transferfaktor des Radionuklids r von Lebensmitteln in die Muttermilch in $d \cdot kg^{-1}$, siehe Anhang 6 Tabelle 2. Beim Verzehr von Säuglingsmilch ist $T_r^{MM,g} = 0$ zu setzen.

$T_r^{MM,h}$: Transferfaktor des Radionuklids r von der Atemluft in die Muttermilch in $d \cdot kg^{-1}$, siehe Anhang 6 Tabelle 2. Beim Verzehr von Säuglingsmilch ist $T_r^{MM,h} = 0$ zu setzen.

U^{MM} : Jährliche Verzehrmenge an Muttermilch in kg, siehe Anhang 5

Die von der stillenden Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommene Aktivität des Radionuklids r ist nach Formel (3.10b) zu berechnen:

$$\mathbf{A_r^{g;1a} = U_{>17a}^{Pf} \cdot C_r^{Pf} + U_{>17a}^{Bl} \cdot C_r^{Bl} + U_{>17a}^{Mi} \cdot C_r^{Mi} + U_{>17a}^{Fl} \cdot C_r^{Fl}} \quad (3.10b)$$

Die von der stillenden Mutter durch Inhalation aufgenommene Aktivität des Radionuklids r ist nach Formel (3.10c) zu berechnen:

$$\mathbf{A_r^{h;1a} = A_r \cdot \bar{\chi}^G \cdot \dot{V}_{>17a}} \quad (3.10c)$$

Für alle Radionuklide außer Tritium (H-3) und Kohlenstoff 14 (C-14) ist die spezifische Aktivität in und auf den Pflanzen nach Formel (3.11) zu berechnen:

$$\mathbf{c_r^n = a_p \cdot A_r \cdot \left[\left(\bar{F}_r^S + f_w \cdot \bar{W}_r^S\right) \cdot \frac{1-\exp\left(-\lambda_{eff,r}^{Pf} \cdot t_e^n\right)}{Y^n \cdot \lambda_{eff,r}^{Pf}} + \left(\bar{F}_r^G + \bar{W}_r^G\right) \cdot \frac{T_r^n \cdot \left(1-\exp\left(-\lambda_{eff,r}^{Bo} \cdot t_b\right)\right)}{p^m \cdot \lambda_{eff,r}^{Bo}}\right] \cdot \exp\left(-\lambda_t \cdot t_V^n\right)} \quad (3.11)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

n : Index zur Kennzeichnung der Pflanzen (vgl. Anhang 4)

m : Index zur Kennzeichnung des Bodens (vgl. Anhang 4)

a_p : Umrechnungsfaktor: 1/ (3,15 · 10^7 s) = 3,2 · 10^{-8} s^{-1}

$\bar{F}_r^S$: Langzeitfalloutfaktor für das Sommerhalbjahr vom 1. Mai bis 31. Oktober in m^{-2}, siehe Kapitel 4.2.1

$\bar{W}_r^S$: Langzeitwashoutfaktor für das Sommerhalbjahr vom 1. Mai bis 31. Oktober in m^{-2}, siehe Kapitel 4.2.2

f_w : Anteil der durch Niederschlag oder bei Beregnung auf der Pflanze abgelagerten Aktivität, siehe Anhang 4

$\lambda_{eff,r}^{Pf}$: Effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r auf der Pflanze in s^{-1}

$\lambda_{eff,r}^{Pf} = \lambda_r + \lambda_V$

- λ_V : Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r auf der Pflanze in s^{-1}, siehe Anhang 4
- λ_r : Physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r in s^{-1}

t_e^n : Kontaminationszeit für Pflanzen der Gruppe n während der Wachstumsperiode in s, siehe Anhang 4

Y^n : Ertrag bzw. Bewuchsdichte von Pflanzen der Gruppe n in kg · m^{-2} Feuchtmasse, siehe Anhang 4

T_r^n : Transferfaktor vom Boden zur Pflanze für das Radionuklid r in Bq · kg^{-1} Feuchtmasse pro Bq · kg^{-1} Trockenboden, jeweils für pflanzliche Produkte inklusive Blattgemüse (n = Pf) oder für Weidepflanzen (n = Wd), siehe Anhang 6 Tabelle 1

$\lambda_{eff,r}^{Bo}$: Effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Nuklids r im Wurzelbereich der Pflanzen in s^{-1}

$\lambda_{eff,r}^{Bo} = \lambda_r + \lambda_{M,r}$

$\lambda_{M,r}$: Verweilkonstante des Radionuklids r aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten außerhalb des Wurzelbereichs in s^{-1}, siehe Anhang 4

t_b : Zeit, in der das Radionuklid r auf dem Boden abgelagert wird und sich im Boden anreichert in s, siehe Anhang 4

p^m : Flächentrockenmasse des Bodens in kg · m^{-2}, für pflanzliche Produkte und Blattgemüse ist m = A (Ackerboden) und für Weidepflanzen ist m = Wd (Weideboden), siehe Anhang 4

t_V^n : Zeit zwischen Ernte und Verbrauch der Pflanzen der Gruppe n in s, siehe Anhang 4

Zur Berücksichtigung der Strahlenexposition durch radioaktive Tochternuklide wird auf den Anhang 15 verwiesen. Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T nach dem 50. Jahr ergibt sich aus der Summe der Jahresdosis des primären Radionuklids und den Jahresdosen der Tochternuklide.

Bei der Berechnung der spezifischen Aktivität von H-3 in den Pflanzen ist die Wasseraufnahme aus der Luftfeuchte (einschließlich Kondensation) und den Niederschlägen zu berücksichtigen. Es wird bei der Aufnahme von Tritium in Form von tritiiertem Wasser angenommen, dass es in die Pflanzen, bezogen auf den natürlichen Wasserstoff, in dem Verhältnis aufgenommen wird, wie es in der Luft oder in der Bodenfeuchte vorliegt. Die spezifische Aktivität von H-3 in der Pflanze ist nach der folgenden Formel zu berechnen:

$$\mathbf{C_{H-3}^n = A_{H-3} \cdot f_H^{Pf} \cdot \left(f_L \cdot a_p \cdot \frac{\bar{\chi}^S}{\bar{\Psi}^S} + f_N \cdot \frac{\bar{W}_{H-3}^S}{2 \cdot J^S \cdot \rho_W}\right)} \quad (3.12)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

C_{H-3}^n : Spezifische Aktivität von Tritium in Pflanzen der Gruppe n in Bq · kg

A_{H-3} : Jährliche Ableitungsmenge von Tritium in Bq

f_H^{Pf} : Massenanteil des Wassers in der Pflanze, siehe Anhang 4

$\bar{\chi}^S$: Langzeitausbreitungsfaktor für das Sommerhalbjahr vom 1. Mai bis 31. Oktober am betrachteten Ort in s · m^{-3}, siehe Kapitel 4.1.3

$\bar{\Psi}^S$: Mittlere absolute Luftfeuchte während der Wachstumsperiode am betrachteten Ort in kg · m^{-3}, siehe Anhang 4

$\bar{W}_{H-3}^S$: Langzeitwashoutfaktor für das Sommerhalbjahr für tritiiertes Wasser am betrachteten Ort in m^{-2}, siehe Kapitel 4.2.2

J^S : Mittlere Niederschlagshöhe für das Sommerhalbjahr in l · m^{-2}

f_L , f_N : Anteil des Tritiuminventars in der Pflanze, der aus der Luftfeuchte bzw. aus den Niederschlägen stammt, siehe Anhang 4

ρ_W : Dichte des Wassers in kg · l^{-1}, siehe Anhang 4

Die Aufnahme von C-14 in die Pflanzen erfolgt bezogen auf den natürlichen Kohlenstoff in dem gleichen Verhältnis, wie es in der Luft am betrachteten Ort vorliegt. Die spezifische Aktivität in den Pflanzen ist zu berechnen nach:

$$C^{n}_{C-14} = a_p \cdot A_{C-14} \cdot \overline{\chi}^{S} \cdot \frac{f^{n}_{C}}{C^{L}_{C}} \qquad (3.13)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

C^{n}_{C-14} : Spezifische Aktivität von C-14 in Pflanzen der Gruppe n in Bq · kg^{-1}

A_{C-14} : Jährliche Ableitungsmenge von C-14 in Bq

f^{n}_{C} : Massenanteil des Kohlenstoffs in der Pflanze, siehe Anhang 4

C^{L}_{C} : Kohlenstoffkonzentration der Luft in kg · m^{-3}, siehe Anhang 4

Die spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Milch ist zu berechnen nach:

$$C^{Mi}_{r} = C^{Fu}_{r} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T^{Mi}_{r} \qquad (3.14)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

C^{Fu}_{r} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Futter der Tiere in Bq · kg^{-1}, siehe Gleichung (3.15)

$\dot{M}_{Fu}$: Tägliche Aufnahme von Futter in kg (Feuchtmasse) · d^{-1}, siehe Anhang 4

T^{Mi}_{r} : Transferfaktor des Radionuklids r vom Futter in die Milch in d · kg^{-1}, siehe Anhang 6 Tabelle 1

Die spezifische Aktivität des Radionuklids r im Futter ist, falls das gelagerte Futter von der Weide stammt, zu berechnen nach:

$$C^{Fu}_{r} = f_p \cdot C^{Wd}_{r} + (1 - f_p) \cdot C^{Lf}_{r} \qquad (3.15)$$

Hierin bedeuten:

f_p : Bruchteil des Jahres, in dem Tiere auf der Weide grasen, siehe Anhang 4

C^{Wd}_{r} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Weidepflanze in Bq · kg^{-1}, nach Gleichung (3.11), (3.12) oder (3.13) berechnet

C^{Lf}_{r} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Lagerfutter in Bq · kg^{-1}, nach Gleichung (3.11), (3.12) oder (3.13) berechnet.

Die spezifische Aktivität des Fleisches ist zu berechnen nach:

$$\mathbf{C^{Fl}_{r} = C^{Fu}_{r} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T^{Fl}_{r} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t^{Fl}_{v})} \qquad (3.16)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

C^{Fl}_{r} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Fleisch in Bq · kg^{-1}

T^{Fl}_{r} : Transferfaktor des Radionuklids r vom Futter in das Fleisch in d · kg^{-1}, siehe Anhang 6 Tabelle 1

t^{Fl}_{v} : Zeit zwischen Schlachten und Fleischverzehr in s, siehe Anhang 4

4 Ausbreitung radioaktiver Stoffe und Umgebungskontamination

4.1 Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre

Nach Anlage VII Teil C Nummer 3 StrlSchV ist der Ausbreitungsrechnung das Gauß-Modell zugrunde zu legen.

4.1.1 Grundgleichung

Bei der Berechnung der Aktivitätskonzentration in der Luft wird die Abluftfahne durch eine zweidimensionale Gauß-Verteilung beschrieben. Dabei wird die Abluftfahne am Boden vollständig reflektiert.

Die Konzentration C am Ort (x,y,z) ergibt sich zu

$$C(x,y,z) = \frac{\dot{A}}{2 \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \pi \cdot u} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2 \cdot \sigma^2_y(x)}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 \cdot \sigma^2_z(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2 \cdot \sigma^2_z(x)}\right)\right] \qquad (4.1)$$

Hierin bedeuten:

C : Aktivitätskonzentration in der Luft in Bq · m^{-3}

x,y,z : Kartesische Koordinaten in m in Ausbreitungsrichtung (x) sowie senkrecht zur Ausbreitungsrichtung horizontal (y) und vertikal (z), der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Fußpunkt der Quelle

$\dot{A}$: Quellstärke in Bq · s^{-1}

$\boldsymbol{\sigma_{y,z}(x)}$: Horizontaler ($\boldsymbol{\sigma_y(x)}$) und vertikaler ($\boldsymbol{\sigma_z(x)}$) Ausbreitungsparameter in m, abhängig von Quelldistanz x, Diffusionskategorie und effektiver Emissionshöhe H, siehe Anhang 7

u : Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe in m · s^{-1}, siehe Kapitel 4.5.3

H : Effektive Emissionshöhe in m

In den Gleichungen (4.1), (4.2), (4.4), (4.12), (4.13), (4.14) und (4.15) ist die Abnahme der Aktivität in der Abluftfahne durch radioaktiven Zerfall, Fallout und Washout während der Transportzeit nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Effekte ist nach der Berechnungsvorschrift in Kapitel 4.2.3 zulässig.

4.1.2 Kurzzeitausbreitungsfaktor

Bei kurzzeitiger Emission ist die Annahme konstanter meteorologischer Bedingungen zulässig; die bodennahe (z = 0) Konzentrationsverteilung $\hat{C}(x,y)$ im Lee der Quelle ist wie folgt zu berechnen:

$$\hat{C}(x,y) = \frac{\dot{A}}{\sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \pi \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma^2_y(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2 \cdot \sigma^2_z(x)}\right) \qquad (4.2)$$

Der Kurzzeitausbreitungsfaktor $\hat{\chi}(x,y)$ ist wie folgt definiert:

$$\hat{\chi}(x,y) = \frac{\hat{C}(x,y)}{\dot{A}} \qquad (4.3)$$

4.1.3 Langzeitausbreitungsfaktor

Bei Emission mit konstanter Quellstärke ergibt sich im Sektor i die Konzentrationsverteilung $\bar{C}_i^{\tau}(x)$ (τ = G für das gesamte Jahr und τ = S für das Sommerhalbjahr vom 1. Mai bis 31. Oktober) durch Summierung der Beiträge aus den 6 Diffusionskategorien j und den M Windgeschwindigkeitsstufen m. Die Variation der Windrichtung innerhalb des Sektors wird durch eine azimutale Mittelung der Konzentrationsbeiträge berücksichtigt.

Analog zum Kurzzeitausbreitungsfaktor $\hat{\chi}(x,y)$ ist der Langzeitausbreitungsfaktor $\bar{\chi}_i^{\tau}(x)$ folgendermaßen definiert:

$$\bar{\chi}_i^{\tau}(x) = \frac{\bar{C}_i^{\tau}(x)}{\dot{A}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot \sum_{j=1}^{6} \frac{\exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_{z,j(x)}^2}\right)}{\sigma_{z,j(x)}} \cdot \sum_{m=1}^{M} \frac{p_{i,j,m}^{\tau}}{u_{j,m}} \quad (4.4)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

N : Anzahl der Sektoren (Es wird empfohlen, N = 12 zu verwenden.)

$p_{i,j,m}^{\tau}$: Häufigkeit, mit der der Wind bei der Diffusionskategorie j und der Windgeschwindigkeit aus der Stufe m in den Sektor i im gesamten Jahr ($\tau = G$) bzw. im Sommerhalbjahr ($\tau = S$) weht. $\sum_{i,j,m} p_{i,j,m}^{\tau} = 1$ für $\tau = G,S$

M : Anzahl der Windgeschwindigkeitsstufen

$u_{j,m}$: Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe für die Stufe m und die Diffusionskategorie j

4.1.4 Vereinfachte Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors

Ist die Berechnung des Langzeitausbreitungsfaktors für das gesamte Jahr bzw. für das Sommerhalbjahr in den 12 Windrichtungssektoren nach Gleichung (4.4) nicht möglich, ist ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors in den einzelnen Sektoren zulässig auf der Grundlage der Häufigkeiten p_i^{τ} in den einzelnen Sektoren.

Der Langzeitausbreitungsfaktor im Sektor i ergibt sich aus Gleichung (4.5) zu

$$\bar{\chi}_i^{\tau} = p_i^{\tau} \cdot \bar{\chi}^{\tau} \quad (4.5)$$

Dabei ist $\bar{\chi}^{G}$ dem Anhang 8, Abb. 1 zu entnehmen und $\bar{\chi}^{S}$ gleich $2 \cdot \bar{\chi}^{G}$ zu setzen.

4.2 Ablagerung radioaktiver Stoffe

4.2.1 Trockene Ablagerung (Fallout)

4.2.1.1 Standortspezifisches Verfahren

Die durch trockene Ablagerung entstehende Bodenkontaminationsrate $\dot{B}_F$ in Bq · m^{-2} · s^{-1} ist proportional der Konzentration der bodennahen Luft. Proportionalitätsfaktor ist die Ablagerungsgeschwindigkeit v_g:

$$\dot{B}_F(x,y) = v_g \cdot C(x,y,0) \quad (4.6)$$

Die Bodenkontamination $\hat{B}_F$ in Bq · m^{-2}, verursacht durch eine Kurzzeit-Emission der Aktivität A in Bq, ist mit Gleichung (4.7) zu berechnen:

$$\hat{B}_F(x,y) = A \cdot v_g \cdot \hat{\chi}(x,y) \quad (4.7)$$

Die Bodenkontamination $\bar{B}_{F,i}^{G}$ für das gesamte Jahr, verursacht durch eine kontinuierlich emittierte Aktivität A für den Sektor i, wird durch Gleichung (4.8) beschrieben:

$$\bar{B}_{F,i}^{G}(x) = A \cdot v_g \cdot \bar{\chi}_i^{G}(x) \quad (4.8)$$

Entsprechend Gleichung (4.3) wird der Kurzzeitfalloutfaktor $\hat{F}$ in m^{-2} wie folgt beschrieben:

$$\hat{F}(x,y) = v_g \cdot \hat{\chi}(x,y) \quad (4.9)$$

Ebenso wird gemäß Gleichung (4.4) für den Sektor i der Langzeitfalloutfaktor $\bar{F}_i^{\tau}$ für das gesamte Jahr ($\tau = G$) bzw. für das Sommerhalbjahr ($\tau = S$) in m^{-2} wie folgt definiert:

$$\bar{F}_i^{\tau}(x) = v_g \cdot \bar{\chi}_i^{\tau}(x) \quad (4.10)$$

Werte für v_g sind dem Anhang 7 Tabelle 3 zu entnehmen.

4.2.1.2 Vereinfachtes Verfahren

Es ist zulässig, den Langzeitfalloutfaktor für das gesamte Jahr $\bar{F}_i^{G}$ für eine vereinfachte Berechnung (vgl. Kapitel 4.1.4) aus den Kurven in Anhang 8, Abb. 1 durch Multiplikation mit der Windrichtungshäufigkeit und der Ablagerungsgeschwindigkeit zu bestimmen; beim Langzeitfalloutfaktor für das Sommerhalbjahr $\bar{F}_i^{S}$ ist der Wert aus den Kurven in Anhang 8, Abb. 1 mit dem Faktor 2 zu multiplizieren.

4.2.2 Ablagerung durch Niederschlag (Washout)

4.2.2.1 Standortspezifisches Verfahren

Die Bodenkontaminationsrate durch Niederschlag $\dot{B}_W$ in Bq · m^{-2} · s^{-1} ist proportional der über die z-Koordinate integrierten Konzentrationsverteilung (Gleichung 4.1). Der Proportionalitätsfaktor ist der Washoutkoeffizient Λ in s^{-1}.

Es ist

$$\Lambda = \Lambda_0 \left(\frac{I}{I_0}\right)^{\kappa} \quad (4.11)$$

Hierin bedeuten:

I : Niederschlagsintensität in mm • h^{-1}

I_0 : Niederschlagsintensität 1 mm • h^{-1}

Λ_0 : Washoutkoeffizient für die Niederschlagsintensität I_0 in s^{-1}, siehe Anhang 7 Tabelle 3

κ : Exponent κ = 0,8 für Schwebstoffe und Jod
κ = 1,0 für tritiiertes Wasser

Die Bodenkontaminationsrate durch Niederschlag berechnet sich aus:

$$\dot{B}_W(x,y) = \frac{\dot{A}\cdot\Lambda}{u\cdot\sigma_y(x)\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{y^2}{2\cdot\sigma_y^2(x)}\right) \quad (4.12)$$

Die Bodenkontamination durch Niederschlag $\hat{B}_W$ in Bq · m^{-2}, verursacht durch eine Kurzeitemission der Aktivität in Bq, wird durch die Gleichung (4.13) beschrieben:

$$\hat{\mathbf{B}}_{\mathbf{W}}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{\mathbf{A}\cdot\boldsymbol{\Lambda}}{\mathbf{u}\cdot\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})\cdot\sqrt{\mathbf{2}\cdot\boldsymbol{\pi}}}\cdot\exp\left(-\frac{\mathbf{y}^2}{\mathbf{2}\cdot\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{y}}^2(\mathbf{x})}\right) \quad (4.13)$$

Der Kurzzeitwachoutfaktor $\hat{W}(x,y)$ lautet analog dem Kurzzeitfalloutfaktor:

$$\hat{W}(x,y) = \frac{\Lambda}{u\cdot\sigma_y(x)\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{y^2}{2\cdot\sigma_y^2(x)}\right) \quad (4.14)$$

Analog ergibt sich die Bodenkontamination $\bar{B}^{\tau}_{W,i}$ ($\tau = G$ für das gesamte Jahr und $\tau = S$ für das Sommerhalbjahr) durch Waschout in Bq · m^{-2} nach Gleichung (4.15) und der Langzeitwachoutfaktor $\bar{W}^{\tau}_i$ in m^{-2} nach Gleichung (4.16):

$$\bar{B}^{\tau}_{W,i}(x) = A\cdot\frac{N}{2\cdot\pi\cdot x}\cdot\sum_{j,m,k} q^{\tau}_{i,j,m,k}\cdot\frac{\Lambda_k}{u_{j,m}} \quad (4.15)$$

$$\bar{\mathbf{W}}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) = \frac{\bar{\mathbf{B}}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{W,i}}(\mathbf{x})}{\mathbf{A}} \quad (4.16)$$

$q^{\tau}_{i,j,m,k}$ ist die Häufigkeit der Niederschläge, geordnet nach Sektor i, Diffusionskategorie j, Windgeschwindigkeitsstufe m und Niederschlagsintensitätsstufe k im gesamten Jahr ($\tau = G$) bzw. im Sommerhalbjahr ($\tau = S$). Die 4-parametrige Ausbreitungsstatistik ist so zu normieren, dass gilt:

$$\sum_{\mathbf{i,j,m,k}} \mathbf{q}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i,j,m,k}} = \mathbf{1} \text{ für } \tau = G,S$$

4.2.2.2 Vereinfachtes Verfahren

Liegt keine 4-parametrige Ausbreitungsstatistik vor, so ist es zulässig, den Langzeitwashoutfaktor durch eine Vereinfachung von Gleichung (4.15) zu berechnen. Für die vereinfachte Rechnung ist der Washoutkoeffizient Λ proportional der Niederschlagsintensität I anzunehmen, das heißt:

$$\Lambda = c\cdot I$$

Der Proportionalitätsfaktor c ist im Anhang 7 Tabelle 3 angegeben.

Ferner ist es zulässig, die aktuelle Windgeschwindigkeit $u_{j,m}$ durch die mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u}^{\tau}_{i,D}$ im gesamten Jahr bzw. im Sommerhalbjahr in effektiver Emissionshöhe für den Sektor i und für neutrale Diffusionskategorien zu ersetzen, sodass dann für den Langzeitwashoutfaktor gilt:

$$\bar{\mathbf{W}}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{N}\cdot\mathbf{c}\cdot\mathbf{J}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i}}}{\mathbf{2}\cdot\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{x}\cdot\bar{\mathbf{u}}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i,D}}}\cdot\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\tau}} \quad (4.17)$$

mit $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{G}} = \mathbf{1}$ und $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{S}} = \mathbf{2}$.

Die Windgeschwindigkeit im Sektor i ist nach folgender Gleichung zu mitteln:

$$\frac{\mathbf{1}}{\bar{\mathbf{u}}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i,D}}} = \frac{\sum_{\mathbf{m}}\frac{\mathbf{p}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i,D,m}}}{\mathbf{u}_{\mathbf{D,m}}}}{\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{p}^{\boldsymbol{\tau}}_{\mathbf{i,D,m}}} \quad (4.18)$$

Für die Anwendung muss die mit dem Sektor i im Bezugszeitraum τ verbundene Niederschlagshöhe J^{τ}_i in mm · a^{-1} des Standorts bekannt sein.

4.2.3 Abreicherungsfaktoren

Fallout, Washout und radioaktiver Zerfall verringern die Menge der Aktivität der radioaktiven Stoffe in der Abluftfahne. Es ist zulässig, diese Effekte zu berücksichtigen, wenn auf die Quellstärke folgende nuklidspezifische Abreicherungsfaktoren angewendet werden:

Für Fallout:

$$\mathbf{f_A} = \exp\left(-\frac{\mathbf{v_g}}{\mathbf{u}}\cdot\sqrt{\frac{\mathbf{2}}{\boldsymbol{\pi}}}\cdot\int_0^{\mathbf{x}}\frac{\exp\left(-\frac{\mathbf{H}^2}{2\cdot\sigma_z^2(x')}\right)}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}}(\mathbf{x}')}\,\mathbf{dx}'\right) \quad (4.19)$$

Für Washout:

$$f_R = \exp\left(-\frac{\Lambda\cdot x}{u}\right) \quad (4.20)$$

Für radioaktiven Zerfall:

$$f_{Z,r} = \exp\left(-\frac{\lambda_r\cdot x}{u}\right) \quad (4.21)$$

Die Gleichung (4.21) ist nicht anzuwenden für die Ermittlung der äußeren Strahlenexposition durch Betasubmersion und Gammasubmersion, wenn die Dosisleistungskoeffizienten mit Berücksichtigung der Tochternuklide verwendet werden.

4.3 Ausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion

4.3.1 Kurzzeitausbreitungsfaktor

4.3.1.1 Standortspezifisches Verfahren

Der Kurzzeitausbreitungsfaktor für Gammasubmersion $\hat{\chi}_{\gamma 1,j}$ in s · m^{-2} für Einzelemissionen bei der Diffusionskategorie j und für die Gamma-Energie 1 MeV ergibt sich aus:

$$\hat{\chi}_{\gamma 1,j} = \int_-^+\int_\infty^\infty\int \Phi_1(\mu_1 z', \mu_1 s)\cdot \frac{\exp\left[-\frac{y'^2}{2\cdot\sigma^2_{y,j}(x')}-\frac{(z'-H)^2}{2\cdot\sigma^2_{z,j}(x')}\right]}{2\cdot\pi\cdot\sigma_{y,j}(x')\cdot\sigma_{z,j}(x')\cdot u}\,dx'dy'dz' \quad (4.22)$$

mit

$$\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{1}}(\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}\mathbf{z}', \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}\mathbf{s}) = \frac{\exp(-\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}\cdot\mathbf{R})}{\mathbf{4}\cdot\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{R}^2}\cdot\mathbf{B}_{\mathbf{1}}(\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}\mathbf{R})\cdot \mathbf{K}_{\mathbf{1}}(\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}\mathbf{z}', \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}\mathbf{s}) \quad (4.23)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

μ_1 : Gesamtschwächungskoeffizient für Gammastrahlen in Luft in m^{-1} (ohne kohärente Streuung) für die Energie E_γ = 1 MeV

x,y,z : Koordinaten des Aufpunktes

x',y',z' : Koordinaten des Quellpunktes (Volumenelement $dx' \cdot dy' \cdot dz'$)

R : Abstand zwischen dem Volumenelement $dx' \cdot dy' \cdot dz'$ der Abluftfahne am Ort (x',y',z') und dem Aufpunkt (x,y,z) in m

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$

$B_1(\mu_1 R)$: Dosisaufbaufaktor in Luft für die Gamma-Energie 1 MeV ohne Einfluss des Bodens, siehe Anhang 7 Tabelle 4

$K_1(\mu_1 z', \mu_1 s)$: Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens, siehe Anhang 7 Tabelle 5

S : Horizontaler Abstand zwischen der senkrechten Projektion vom Volumenelement der Abluftfahne auf den Boden und Aufpunkt

$$s = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

4.3.1.2 Vereinfachtes Verfahren

Es ist zulässig, den Kurzzeitausbreitungsfaktor für Gammasubmersion $\hat{\chi}_{\gamma 1,j}$ bei der Diffusionskategorie j für eine vereinfachte Berechnung aus den Kurven in Anhang 9 zu entnehmen. Dieser auf die Windgeschwindigkeit von u = 1 $m \cdot s^{-1}$ normierte Wert ist mit der nach Gleichung (4.29) oder (4.30) berechneten Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe bei der Diffusionskategorie j zu korrigieren.

4.3.2 Langzeitausbreitungsfaktor

4.3.2.1 Standortspezifisches Verfahren

Der Langzeitausbreitungsfaktor für Gammasubmersion $\bar{\chi}^G_{\gamma 1,i}$ für das gesamte Jahr in $s \cdot m^{-2}$ bei konstanter Daueremission für die Energie 1 MeV (siehe Gleichung (3.4)) ist als Summe der Beiträge in der jeweiligen Ausbreitungsrichtung (Sektor i) und der Beiträge zu berechnen, die von den in den übrigen Sektoren vorhandenen Aktivitätskonzentrationen herrühren:

$$\bar{\chi}^G_{\gamma 1,i}(r) = \sum_{k=1}^{N} \sum_j \sum_m \frac{u}{u_{j,m}} p^G_{k,j,m} \cdot S_{|k-i|,j,1}(r) \qquad (4.24)$$

Die Beiträge $S_{v,j,1}$ aus dem Sektor der Ausbreitungsrichtung ($v = 0$) und aus dem v-ten Nebensektor ($v = 1, \ldots, N/2$) ergeben sich aus

$$S_{v,j,1}(r) = \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{(2v-1)\cdot\pi/N}^{(2v+1)\cdot\pi/N} \hat{\chi}_{\gamma 1,j}(r \cos\vartheta, r \sin\vartheta, 0)\, d\vartheta \qquad (4.25)$$

mit ϑ als Azimutalwinkel.

Für $v > N/2$ ist $S_{v,j,1}(r)$ gegeben durch

$$S_{v,j,1}(r) = S_{N-v,j,1}(r). \qquad (4.26)$$

Die mit den Ausbreitungsparametern $\sigma_{z,j}$ aus dem Anhang 7 Tabelle 1 und der Jülicher Wetterstatistik von 1969 bis 1986 berechneten Langzeitausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion (Wert für das gesamte Jahr) für die Hauptausbreitungsrichtung sind im Anhang 10 angegeben.

4.3.2.2 Vereinfachtes Verfahren

Zur Berechnung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion ist es zulässig, die Werte aus Anhang 10 für die effektiven Emissionshöhen 20, 50, 100, 150 und 200 Meter in Verbindung mit einer langjährigen Ausbreitungsstatistik gemäß Kapitel 4.5.2 zu benutzen.

4.4 Ungleichmäßige Emissionen

4.4.1 Anwendung von Langzeitausbreitungsfaktoren

a) Zufällig verteilte Emissionen

Bei ungleichmäßiger Quellstärke dürfen Langzeitausbreitungsfaktoren angewendet werden, wenn folgende Voraussetzungen vorliegen:

1) Die pro Tag, das heißt in Zeiträumen von je 24 Stunden, emittierte Aktivitätsmenge ist nicht größer als 1/100 der gleichmäßig über das Jahr verteilt angenommenen Jahresemission.[3])

2) Die Emissionen nach 1) finden nicht systematisch jeweils zur gleichen Tageszeit, sondern annähernd gleichmäßig über alle Tageszeiten verteilt statt.

3) In einem beliebigen Zeitraum eines halben Jahres wird die Hälfte der angenommenen Jahresemission nicht überschritten.

b) Periodische Emissionen

Bei periodischen Emissionen dürfen die Langzeitausbreitungsfaktoren angewendet werden, wenn folgende Voraussetzungen vorliegen:

1) Die pro Tag, das heißt in Zeiträumen von je 24 Stunden, emittierte Aktivitätsmenge ist nicht größer als 1/100 der gleichmäßig über das Jahr verteilt angenommenen Jahresemission.[3])

2) In einem beliebigen Zeitraum eines halben Jahres wird die Hälfte der angenommenen Jahresemission nicht überschritten.

Die errechneten Organdosen in der Hauptausbreitungsrichtung sind mit dem Faktor 2 zu multiplizieren.

4.4.2 Anwendung von Kurzzeitausbreitungsfaktoren

Ist mit Emissionen zu rechnen, die nicht unter die Fallgruppen von 4.4.1 fallen, so ist wie folgt zu verfahren:

a) Einstündige Emissionen

Dauert die Emission nicht wesentlich länger als eine Stunde, dann sind auf diese Einzelemission die Kurzzeitausbreitungsfaktoren anzuwenden.

[3]) Als Tageswert ist für Jod während der Weideperiode 1/200 der Jahresemissionsmenge und als zusätzliche Beschränkung in 6 Monaten die Hälfte des Jahreswertes vorgesehen.

b) Mehrstündige Emissionen

Erstrecken sich Einzelemissionen über Zeiträume von mehr als 3 Stunden, dann sind die mit Hilfe des Kurzzeitausbreitungsfaktors errechneten Jahresdosen mit den folgenden Faktoren zu multiplizieren:

Δt = 6 h Faktor 5/10

$\Delta t = 12$ h Faktor 4/10

$\Delta t = 24$ h Faktor 3/10

Können mehrere Einzelemissionen bei gleicher Ausbreitungsrichtung und Ausbreitungskategorie stattfinden, so sind die daraus resultierenden Jahresdosen zu überlagern.

4.5 Meteorologische Daten

4.5.1 Ausbreitungsparameter σ_y und σ_z

Die Ausbreitungsparameter sind als Potenzfunktionen der Quelldistanz darzustellen:

$$\sigma_y = p_y \cdot x^{q_y} \quad (4.27)$$

$$\sigma_z = p_z \cdot x^{q_z} \quad (4.28)$$

Die Koeffizienten p_y und p_z und die Exponenten q_y und q_z sind im Anhang 7, Tabelle 1 für verschiedene effektive Emissionshöhen angegeben.

Ist die Ausbreitung durch Gebäude gestört, sind die Ausbreitungsparameter nach Kapitel 4.6.2 zu bestimmen.

4.5.2 Ausbreitungsstatistik

Zur Durchführung der Ausbreitungsrechnung ist eine 4-parametrige, mindestens 5-jährige Ausbreitungsstatistik zu verwenden. Die Ausbreitungsstatistiken sind nach der KTA-Regel 1508 [4]), nach dem Verfahren des Deutschen Wetterdienstes oder einem vergleichbaren Verfahren zu bestimmen.

Liegt für den Standort eine 4-parametrige, langjährige Ausbreitungsstatistik vor, welche die Häufigkeit der einzelnen Wettersituationen geordnet nach Windrichtung, -geschwindigkeit, Niederschlagsintensität und Diffusionskategorie enthält, kann die Ausbreitungsrechnung unmittelbar vorgenommen werden.

Andernfalls hat die zuständige Behörde zu bestimmen,

– ob eine 3-parametrige Ausbreitungsstatistik für den Standort oder
– ob auf den Standort anwendbare Ausbreitungsstatistiken des Deutschen Wetterdienstes oder von anderen Institutionen

bei der Ausbreitungsrechnung zu verwenden sind.

4.5.3 Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe

Die Windgeschwindigkeit u in Emissionshöhe ist aus der Windgeschwindigkeit u_1 in Bezugshöhe z_1 nach folgender Formel zu ermitteln:

Für H größer als oder gleich 10 m ist

$$u = u_1 \cdot \left(\frac{H}{z_1}\right)^{m_j} \quad (4.29)$$

Für H kleiner als 10 m ist

$$u = u_1 \cdot \left(\frac{10}{z_1}\right)^{m_j} \quad (4.30)$$

Dabei ist

u_1: Windgeschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$ in Bezugshöhe z_1 oberhalb des mittleren Störniveaus

z_1: Bezugshöhe in m

m_j: Exponent des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils für die Diffusionskategorie j

Für den Exponenten m_j sind die in Anhang 7 Tabelle 2 angegebenen Werte zu verwenden, falls keine ortsspezifischen Werte vorliegen.

Eine Korrektur der effektiven Emissionshöhe aufgrund besonderer orographischer Verhältnisse ist bei der Berechnung der Windgeschwindigkeit nicht zu berücksichtigen.

Stehen Messwerte der Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe zur Verfügung, sind diese zu verwenden.

4.6 Örtliche Besonderheiten

4.6.1 Kaminüberhöhung

Die Kaminabluft verlässt den Kamin in der Regel mit einem Austrittsimpuls und mit einer höheren Temperatur als die der Umgebung. Beide Effekte führen zu einer Kaminüberhöhung ΔH.

Bei der Berücksichtigung dieser Effekte für die Ermittlung der Strahlenexposition ist zu beachten, dass Bebauung und Bewuchs zu einer Anhebung der Untergrenze der Ausbreitungsschicht der Atmosphäre um den Betrag Δz führen.

4.6.2 Gebäudeeinfluss

Ist die effektive Emissionshöhe H kleiner als die doppelte Höhe der umliegenden Gebäude, muss der Gebäudeeinfluss berücksichtigt werden. Dabei wird mit H_G die Gebäudehöhe und mit b_G die Gebäudebreite bezeichnet. I_G ist der kleinere Wert von Gebäudebreite und Gebäudehöhe.

Falls $H < (H_G + I_G)$ ist und die Quelle sich auf dem Dach des Gebäudes, irgendwo im Abstand von $I_G/4$ vom Gebäude entfernt, befindet oder weniger als $3\ I_G$ direkt in oder entgegen der Ausbreitungsrichtung vom Gebäude entfernt liegt, ist als effektive Emissionshöhe die wie folgt definierte Höhe h' zu verwenden:

a) Für $H > H_G$ ist die effektive Emissionshöhe $h' = 0{,}5 \cdot [3H - (H_G + I_G)]$ und

b) für $H \leq H_G$ ist $h' = H - 0{,}5\ I_G$.

Ist h' kleiner als $I_G/2$, so ist $h' = I_G/2$ zu setzen. Ist h' kleiner als H_G, so müssen die Ausbreitungsparameter σ_y und σ_z durch die folgenden Größen $\sum_y$ und $\sum_z$ ersetzt werden:

[4]) KTA 1508 – Instrumentierung zur Ermittlung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre, BAnz. Nr. 37a vom 22. Februar 1989 in der jeweils gültigen Fassung.

$$\sum_y(x) = \left[\sigma_y^2(x) + \frac{(I_G)^2}{\pi}\right]^{0,5} \quad (4.31)$$

$$\sum_z(x) = \left[\sigma_z^2(x) + \frac{(I_G)^2}{\pi}\right]^{0,5} \quad (4.32)$$

Von den Vorschriften a) und b) darf abgewichen werden, wenn der Gebäudeeinfluss aus Windkanalversuchen bestimmt wird.

4.6.3 Kühlturmeinfluss

Der Einfluss von Kühltürmen auf die Ausbreitung der Abluftfahne ist bei der Ermittlung der Strahlenexposition zu berücksichtigen. Insbesondere sind folgende Erscheinungen zu beachten:

1. Durch die Ausmaße eines Kühlturms wird zusätzlich mechanische Turbulenz erzeugt. Dies wirkt sich auf die Ausbreitung der Abluftfahne insbesondere dann aus, wenn die Windrichtung vom Kamin zum Kühlturm oder umgekehrt weist. In diesen Fällen erhöht sich das Konzentrationsmaximum und rückt näher an die Quelle heran.
2. Unterschiede zwischen gestörter und ungestörter Ausbreitung ergeben sich vor allem bei stabiler Ausbreitungskategorie, bei labiler sind diese Unterschiede vernachlässigbar.
3. Ist der Kühlturm in Betrieb und vermischen sich die Fahnen des Kühlturms und des Kamins, so kann durch den Auftrieb der Kühlturmfahne die bodennahe Aktivitätskonzentration verringert werden.

Wenn die Ergebnisse vorliegender Untersuchungen wegen der Besonderheiten des Standortes oder der Anlage oder Einrichtung nicht anwendbar sind, ist der Einfluss des Kühlturms auf die Ausbreitung der Abluftfahne durch Windkanalversuche zu bestimmen.

4.6.4 Orographie

Das Ausbreitungsmodell setzt voraus, dass das Gelände ausreichend eben ist. Das Gelände ist als ausreichend eben anzusehen, solange der Neigungswinkel des Geländes nicht größer als 5° ist. Dämme, Wälle und sonstige kleinere Erhebungen sind der Bebauung und dem Bewuchs zuzurechnen.

Im Falle von Geländeformen, die über den Neigungswinkel von 5° hinausgehen, kann der Einfluss auf die Ausbreitung mithilfe von theoretischen (Strömungs- und Ausbreitungsmodellen, die die Orographie berücksichtigen) und experimentellen Untersuchungen (zum Beispiel Windkanalexperimenten) berücksichtigt werden. Wenn solche Untersuchungen nicht vorliegen, sind die Ausbreitungsfaktoren wie folgt zu modifizieren:

1. Diffusionskategorien A bis D

a) $\mathbf{h(x,0) < \frac{H}{2}}$

$$\hat{\chi}(x,y,z=h(x,0)) = \frac{1}{\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\cdot\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(H-h(x,0))^2}{2\cdot\sigma_z^2}\right] \quad (4.33)$$

b) $\mathbf{h(x,0) \geq \frac{H}{2}}$

$$\hat{\chi}(x,y,z=h(x,0)) = \frac{1}{\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\cdot\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(H/2)^2}{2\cdot\sigma_z^2}\right] \quad (4.34)$$

2. Diffusionskategorien E und F

a) $\mathbf{h(x,0) < H}$

$$\hat{\chi}(x,y,z=h(x,0)) = \frac{1}{\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\cdot\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(H-h(x,0))^2}{2\cdot\sigma_z^2}\right] \quad (4.35)$$

b) $\mathbf{h(x,0) \geq H}$

$$\hat{\chi}(x,y,z=h(x,0)) = \frac{1}{\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\cdot\sigma_y^2}\right] \quad (4.36)$$

Hierbei bedeuten neben den bereits erklärten Symbolen:

$h(x,y)$: Höhe des Geländes bezogen auf den Fußpunkt des Emissionsortes in m

$h(x,0)$: Höhe des Geländes in Ausbreitungsrichtung in m

Für die Langzeitausbreitungsfaktoren für das gesamte Jahr bzw. das Sommerhalbjahr sind die entsprechenden Modifikationen anzubringen.

5 Strahlenexposition bei der Ableitung mit Wasser

5.1 Expositionspfade

Bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser sind folgende Expositionspfade zu berücksichtigen:

Zur Ermittlung der äußeren Strahlenexposition:

1. Exposition durch Aufenthalt auf Sediment

Zur Ermittlung der inneren Strahlenexposition:

2. Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung (Ingestion) auf dem Weg
   - **2.1.** Trinkwasser
   - **2.2.** Wasser – Fisch
   - **2.3.** Viehtränke – Kuh – Milch
   - **2.4.** Viehtränke – Tier – Fleisch
   - **2.5.** Beregnung – Futterpflanze – Kuh – Milch
   - **2.6**. Beregnung – Futterpflanze – Tier – Fleisch
   - **2.7.** Beregnung – Pflanze

2.8. Muttermilch infolge der Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Mutter über die oben genannten Ingestionspfade

Wenn dies aufgrund der örtlichen Besonderheiten des Standortes begründet ist, sind außerdem zu berücksichtigen:

3. Landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten
4. Landwirtschaftliche Nutzung von Fluss- und Klärschlamm

Bei der Berechnung der Strahlenexposition ist wie folgt zu verfahren:

Unter Berücksichtigung realer Nutzungsmöglichkeiten sind die Stellen mit der höchsten effektiven Dosis oder mit den höchsten Organdosen zugrunde zu legen. Zusätzlich sind an den Stellen mit maximaler äußerer Strahlenexposition im Nah- bzw. Fernbereich die jährlichen Radionuklidinkorporationen zu berücksichtigen, die sich aus dem Verzehr von Lebensmitteln entsprechend den Ernährungsgewohnheiten der Anlage VII Teil B Tabelle 1 StrlSchV ergeben. Dabei sind sowohl im Nahbereich als auch im Fernbereich jeweils ausschließlich die Lebensmittel zu berücksichtigen, die dort erzeugt werden und deren Verzehr zur höchsten effektiven Dosis oder zu den höchsten Organdosen führt.

5.2 Anwendungsbereich der Rechenmodelle

Die Rechenmodelle gelten für die Einleitung radioaktiver Stoffe in Fließgewässer.

Für die Berechnungen beginnen die Küstengewässer wie folgt:

Elbe: Brunsbüttel

Ems: Emden

Weser: Bremerhaven

Bei Einleitung in den Tidebereich von Fließgewässern sind spezielle Parameter zu berücksichtigen, die bei den Modellen angegeben sind.

5.3 Ausbreitung radioaktiver Stoffe in Fließgewässern

Die Konzentration $C_r^{Fließ}$ in Bq · l^{-1} des Radionuklids r im Fließgewässer ist für den jeweiligen Expositionspfad folgendermaßen zu berechnen:

$$C_r^{Fließ} = a_w \cdot \frac{A_r}{Q} \cdot f_v \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_f) \qquad (5.1)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

A_r : Jährliche Ableitungsmenge des Radionuklids r in Bq (zum Modellgemisch siehe Anhang 12)

a_w : Umrechnungsfaktor: 3,2 · 10^{-11} m^3 · s^{-1} · l^{-1}

Q : Abfluss der zu betrachtenden Anlage oder Einrichtung in m^3 · s^{-1}; ist für Kernkraftwerke gleich dem Abfluss des Kühlwassers zu setzen, weil radioaktive Abwässer immer zuerst in den Kühlwasserstrom eingeleitet werden. Bei Kühlturmbetrieb gibt es einen Strom von Abschlämm- und Nebenkühlwasser, dessen Abfluss gleich Q zu setzen ist.

f_v : Mischungsverhältnis zwischen Abfluss der zu betrachtenden Anlage oder Einrichtung und Abfluss des Fließgewässers am betrachteten Ort

t_f : Fließzeit zwischen Einleitungsstelle und betrachtetem Ort in s

a) Einleitungen oberhalb der Tidegrenze

Von der Ableitungsstelle ausgehend bildet sich im Vorfluter eine Abwasserfahne aus, die sich allmählich mit dem Wasser des Vorfluters mischt. Direkt an der Ableitungsstelle beträgt $f_v = 1$, nach vollständiger Durchmischung ist:

$$f_v = \frac{Q}{MQ} \qquad (5.2)$$

Innerhalb dieser Grenzen ist das Mischungsverhältnis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle entsprechend den örtlichen Gegebenheiten anzusetzen, wobei MQ der mittlere Abfluss (Mittelwasser) in m^3 · s^{-1} nach DIN 4049, Teil 1, ist.

Für die Expositionspfade „Beregnung – Futterpflanze – Kuh – Milch“, „Beregnung – Futterpflanze – Tier – Fleisch“ und „Beregnung – Pflanze“ ist statt MQ der mittlere Abfluss für das Sommerhalbjahr SoMQ zu verwenden.

b) Einleitungen unterhalb der Tidegrenze

Von der Ableitungsstelle kann sich, bedingt durch den Tideeinfluss, sowohl stromabwärts als auch stromaufwärts eine Abwasserfahne ausbilden. Da die Vermischung f_v in unmittelbarer Nähe des Auslasses stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängt (eventuelle Rückführung kontaminierten Wassers in den Kühlkreislauf), muss diese Größe näher untersucht werden.

Für die maximale Vermischung des Abwassers kann nicht die gesamte vorbeiflutende Wassermenge in Ansatz gebracht werden, sondern nur der jeweilige Oberwasserzufluss, der bei der Berechnung der Vermischung als konstant und kontinuierlich anzusetzen ist:

$$f_v = \frac{Q}{MQ_0}$$

Dabei ist MQ_0 der mittlere Oberwasserzufluss nach DIN 4049, Teil 1, das heißt der Abfluss von oberhalb der Tidegrenze.

Für die Expositionspfade „Beregnung – Futterpflanze – Kuh – Milch“, „Beregnung – Futterpflanze – Tier – Fleisch“ und „Beregnung – Pflanze“ ist statt MQ_0 der mittlere Oberwasserzufluss für das Sommerhalbjahr $SoMQ_0$ zu verwenden.

5.4 Berechnung der äußeren Strahlenexposition

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition durch das Radionuklid r ist bei Aufenthalt auf Ufersediment oder auf Überschwemmungsgebieten oder auf Spülfeldern:

$H_{T,a,r} = H_{T,Se,r}$ oder

$H_{T,a,r} = H_{T,Ü,r}$ oder

$H_{T,a,r} = H_{T,Sp,r}$

Es bedeuten:

$H_{T,a,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe in Fließgewässer durch das Radionuklid r in Sv

$H_{T,Se,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition beim Aufenthalt auf Ufersediment durch das Radionuklid r in Sv

$H_{T,Ü,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition beim Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten durch das Radionuklid r in Sv

$H_{T,Sp,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition beim Aufenthalt auf Spülfeldern durch das Radionuklid r in Sv

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition bei Ableitung radioaktiver Stoffe in Fließgewässer ergibt sich aus der Summe der Dosisbeiträge durch alle Radionuklide:

$$H_{T,a} = \sum_r H_{T,a,r} \qquad (5.3)$$

5.4.1 Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Ufersediment

Die Jahresdosis $H_{T,Se,r}$ im Organ oder Gewebe T durch das Radionuklid r bei Aufenthalt auf dem Ufersediment ergibt sich aus:

$$\mathbf{H_{T,Se,r} = O_r(t_{Se}) \cdot f_u \cdot t_A \cdot g_{b,r,T} \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \qquad (5.4)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$O_r(t_{Se})$: Zeitabhängige flächenbezogene Aktivität des Radionuklids r in Bq · m^{-2}

f_u : Faktor, der die endliche Geometrie des Uferstreifens gegenüber einer unendlich ausgedehnten Flächenquelle berücksichtigt. ($f_u = 1{,}0$ für unendlich ausgedehnte Flächenquelle, $f_u = 0{,}2$ für Uferstreifen)

t_A : Jährliche Aufenthaltszeit am Ufer oder auf Überschwemmungsgebieten oder auf Spülfeldern in s, siehe Anhang 5

Die zeitabhängige flächenbezogene Aktivität $O_r(t_{Se})$ für das Radionuklid r ist wie folgt zu berechnen:

$$O_r(t_{Se}) = \frac{\dot{M}_{Se} \cdot C_r^{Sch}}{\lambda_r}\left[1 - \exp(-\lambda_r \cdot t_{Se})\right] \qquad (5.5)$$

Mit dieser Formel sind für die langfristige Betrachtung auch sich periodisch wiederholende Ablagerungen, wie zum Beispiel durch jährliche Überschwemmungen, mit abgedeckt.

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\dot{M}_{Se}$: Flächenmasse der in der Zeiteinheit abgelagerten Sedimentschicht in kg · m^{-2} · s^{-1}

C_r^{Sch} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Schwebstoffen in Bq · kg^{-1} Trockenmasse

t_{Se} : Sedimentationsdauer in s, siehe Anhang 4

Die Flächenmasse $\dot{M}_{Se}$ der in der Zeiteinheit abgelagerten Sedimentschicht ergibt sich aus:

$$\dot{M}_{Se} = \rho_{Se} \cdot v_{Se} \qquad (5.6)$$

Es ist:

ρ_{Se} : Dichte des Sediments in kg · m^{-3} (Trockenmasse), siehe Anhang 4

v_{Se}: Sedimentationsgeschwindigkeit in m · s^{-1}, siehe Anhang 4

Für die spezifische Aktivität in Schwebstoffen C_r^{Sch} gilt nach Einstellung des Gleichgewichts im Wasser-Schwebstoff-System:

$$C_r^{Sch} = K_F^r \cdot C_r^{Fließ} \qquad (5.7)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

K_F^r: Konzentrationsfaktor für Schwebstoffe für das Radionuklid r in l · kg^{-1}, siehe Anhang 14

mit

$$K_e^r = \frac{\rho_{Se} \cdot v_{Se} \cdot K_F^r}{\ln 2} \qquad (5.8)$$

ist die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch das Radionuklid r bei Aufenthalt auf dem Ufersediment wie folgt zu berechnen:

$$\mathbf{H_{T,Se,r} = K_e^r \cdot t_A \cdot f_u \cdot C_r^{Fließ} \cdot g_{b,r,T} \cdot T_r \cdot \left(1 - \exp(-\lambda_r \cdot t_{Se})\right) \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \qquad (5.9)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

T_r : Physikalische Halbwertszeit des Radionuklids r in s

K_e^r: Übergangskonstante für das Radionuklid r in l · m^{-2} · s^{-1}, siehe Anhang 14

Um die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften der Elemente zu berücksichtigen, werden die Elemente in drei Gruppen eingeteilt. Die Zeitabhängigkeit der Anlagerung an Schwebstoffe ist durch Einführung einer Halbwertszeit $T_{Anl,r}$ zu berücksichtigen:

$$\widehat{K}_e^r(t) = K_e^r\left(1 - \exp\left(-\lambda_{Anl,r} \cdot t_f\right)\right) \qquad (5.10)$$

mit

$$\lambda_{Anl,r} = \frac{\ln 2}{T_{Anl,r}}$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$T_{Anl,r}$: Halbwertszeit für die Anlagerung des Radionuklids r an Schwebstoffe in s, siehe Anhang 14

$\lambda_{Anl,r}$: Anlagerungskonstante in s^{-1} für das Radionuklid r

Im Anhang 14 Tabelle 2 sind Werte der Übergangskonstanten K_e^r für die verschiedenen Elementgruppen für den Nah- und Fernbereich angegeben.

Die Reichweite des Nahbereiches bzw. der Beginn des Übergangsbereiches und Fernbereiches werden bestimmt durch die Kontaktzeit der Radionuklide mit den Schwebstoffen von der Einleitstelle bis zum betrachteten Ort und sind damit abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Vorfluters.

Für den Nahbereich beträgt die maximale Anlagerungszeit an Schwebstoffe 10 Stunden. Im Fernbereich liegt eine vollständige Durchmischung der Abwasserfahne mit dem Vorfluter vor. Die Anlagerungszeit an Schwebstoffe beträgt 5 Tage (Gleichgewicht).

Im Übergangsbereich ist die Übergangskonstante K_e^r durch $\widehat{K}_e^r(t)$ nach Gleichung (5.10) zu ersetzen. Hierin ist für K_e^r der entsprechende Wert für den Fernbereich zu verwenden.

Bilden sich während der Betriebsphase der Anlage nach der Ablagerung radioaktiver Stoffe auf dem Boden Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklids mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

5.4.2 Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten

Die Jahresdosis $H_{T,Ü,r}$ im Organ oder Gewebe T durch Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten ist wie folgt zu berechnen:

$$\mathbf{H_{T,Ü,r} = K_e^r \cdot t_A \cdot C_r^{Fließ} \cdot g_{b,r,T} \cdot \frac{\ln 2}{\lambda_{eff,r}^{Ü}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_{eff,r}^{Ü} \cdot t_{Se}\right)\right] \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \quad (5.11)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\lambda_{eff,r}^{Ü}$: Effektive Zerfallskonstante für das Radionuklid r auf Überschwemmungsgebieten in s^{-1}
$\lambda_{eff,r}^{Ü} = \lambda_r + \lambda_Ü$

$\lambda_Ü$: Abbaukonstante zur Berücksichtigung des Eindringens der Radionuklide in tiefere Bodenschichten unter Überschwemmungsgebieten in s^{-1}, siehe Anhang 4

Bilden sich während der Betriebsphase der Anlage nach der Ablagerung radioaktiver Stoffe auf dem Boden Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklids mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

5.4.3 Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Spülfeldern

Die Jahresdosis $H_{T,Sp,r}$ im Organ oder Gewebe T durch das Radionuklid r bei Aufenthalt auf Spülfeldern ist wie folgt zu berechnen:

$$\mathbf{H_{T,Sp,r} = \bar{C}_r^{Se} \cdot \rho_{Sp} \cdot g_{b,r,T} \cdot t_A \cdot U_r \cdot \exp\left(-\lambda_r \cdot t_{Sp}\right) \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \quad (5.12)$$

Hier bedeuten neben den bereits erklärten Symbolen:

$\bar{C}_r^{Se}$: Mittlere spezifische Aktivität des Radionuklids r im Sediment in Bq · kg^{-1} Trockenmasse zum Zeitpunkt des Ausbaggerns

U_r : Effektive Schichtdicke zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung, siehe Anhang 4

t_{Sp} : Zeit zwischen dem Aufspülen und der Begehbarkeit in s, siehe Anhang 4

ρ_{Sp} : Dichte des Spülfeldbodens in kg · m^{-3} Trockenmasse, siehe Anhang 4

Die mittlere spezifische Aktivität der Sedimentschicht zum Zeitpunkt des Ausbaggerns $\bar{C}_r^{Se}$ ist gegeben durch:

$$\bar{C}_r^{Se} = \frac{K_F^r \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_{Anl,r} \cdot t_f\right)\right] \cdot C_r^{Fließ} \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_r \cdot t_a\right)\right]}{\lambda_r \cdot t_a} \quad (5.13)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

t_a : Zeit zwischen zwei Ausbaggerungen in s, ortsspezifisch

Damit errechnet sich die Jahresdosis $H_{T,Sp,r}$ im Organ oder Gewebe T bei Aufenthalt auf Spülfeldern zu:

$$\mathbf{H_{T,Sp,r} = K_F^r \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_{Anl,r} \cdot t_f\right)\right] \cdot C_r^{Fließ} \cdot \rho_{Sp} \cdot g_{b,r,T} \cdot t_A \cdot U_r \cdot \exp\left(-\lambda_r \cdot t_{Sp}\right) \cdot \frac{1 - \exp\left(-\lambda_r \cdot t_a\right)}{\lambda_r \cdot t_a} \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \quad (5.14)$$

Bilden sich während der Betriebsphase der Anlage nach der Ablagerung radioaktiver Stoffe auf dem Boden Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklids mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

5.5 Berechnung der inneren Strahlenexposition

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition durch das Radionuklid r ist für die Referenzperson in allen Altersgruppen > 1a nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$H_{T,g,r} = \left(U^W \cdot C_r^W + U^{Fi} \cdot C_r^{Fi} + U^{Mi} \cdot C_r^{Mi} + U^{Fl} \cdot C_r^{Fl} + U^{Pf} \cdot C_r^{Pf} + U^{Bl} \cdot C_r^{Bl}\right) \cdot g_{g,r,T} \quad (5.15)$$

Hier bedeuten:

$H_{T,g,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition des Radionuklids r bei

kontinuierlicher und gleichbleibender Jahresaktivitätszufuhr des Radionuklids r in Sv

$g_{g,r,T}$: Ingestionsdosiskoeffizient des Radionuklids r für das Organ oder Gewebe T in Sv · Bq^{-1}, siehe Anhang 3

U^{W} : Jährliche Verzehrsmenge an Trinkwasser in kg, siehe Anhang 5

U^{Fi} : Jährliche Verzehrsmenge an Fischfleisch in kg, siehe Anhang 5

U^{Mi} : Jährliche Verzehrsmenge an Milch und Milchprodukten in kg, siehe Anhang 5

U^{Fl} : Jährliche Verzehrsmenge an Fleisch und Fleischwaren in kg, siehe Anhang 5

U^{Pf} : Jährliche Verzehrsmenge an pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse in kg, siehe Anhang 5

U^{Bl} : Jährliche Verzehrsmenge an Blattgemüse in kg, siehe Anhang 5

C_r^{W} : Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in Trinkwasser in Bq · kg^{-1}, siehe Gleichung (5.17)

C_r^{Fi} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fischfleisch in Bq · kg^{-1},siehe Gleichung (5.18)

C_r^{Mi} Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Milch in Bq · kg^{-1} siehe Gleichung (5.19, 5.23)

C_r^{Fl} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fleisch in Bq · kg^{-1}, siehe Gleichung (5.20, 5.23)

C_r^{Pf} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse in Bq · kg^{-1}, siehe Gleichung (5.21)

C_r^{Bl} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Blattgemüse in Bq · kg^{-1}, siehe Gleichung (5.21)

Für die Referenzperson in der Altersgruppe ≤ 1 a ist der Verzehr von Beikost und die Aufnahme von Muttermilch bzw. Säuglingsmilch zu berücksichtigen. Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T ist für die Referenzperson der Altersgruppe ≤ 1 a:

$$\mathbf{H_{T,g,r}} = \left[\mathbf{U^{W}_{\leq 1a}} \cdot \mathbf{C_r^{W}} + \mathbf{U^{Fi}_{\leq 1a}} \cdot \mathbf{C_r^{Fi}} + \mathbf{U^{Mi}_{\leq 1a}} \cdot \mathbf{C_r^{Mi}} + \mathbf{U^{Fl}_{\leq 1a}} \cdot \mathbf{C_r^{Fl}} + \mathbf{U^{Pf}_{\leq 1a}} \cdot \mathbf{C_r^{Pf}} + \mathbf{U^{Bl}_{\leq 1a}} \cdot \mathbf{C_r^{Bl}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{365 \cdot a_d}} \cdot \mathbf{A_r^{g;1a}} \cdot \mathbf{T_r^{MM,g}} \cdot \mathbf{U^{MM}}\right] \cdot \mathbf{g_{g,r,T}} \quad (5.15a)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\mathbf{a_d}$: Zeitraum eines Tages; $a_d = 1$ d

$\mathbf{A_r^{g;1a}}$: Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommen wird, siehe Gleichung (5.15b)

$\mathbf{T_r^{MM,g}}$: Transferfaktor des Radionuklids r von Lebensmitteln in die Muttermilch in d · kg^{-1}, siehe Anhang 6 Tabelle 2. Beim Verzehr von Säuglingsmilch ist $\mathbf{T_r^{MM,g}} = \mathbf{0}$ zu setzen.

$\mathbf{U^{MM}}$: Jährliche Verzehrsmenge an Muttermilch in kg, siehe Anhang 5

Die von der stillenden Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommene Aktivität des Radionuklids r ist nach Gleichung (5.15b) zu berechnen:

$$\mathbf{A_r^{g;1a}} = \mathbf{U^{W}_{>17a}} \cdot \mathbf{C_r^{W}} + \mathbf{U^{Fi}_{>17a}} \cdot \mathbf{C_r^{Fi}} + \mathbf{U^{Mi}_{>17a}} \cdot \mathbf{C_r^{Mi}} + \mathbf{U^{Fl}_{>17a}} \cdot \mathbf{C_r^{Fl}} + \mathbf{U^{Pf}_{>17a}} \cdot \mathbf{C_r^{Pf}} + \mathbf{U^{Bl}_{>17a}} \cdot \mathbf{C_r^{Bl}} \quad (5.15b)$$

Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition ergibt sich zu

$$H_{T,g} = \sum_r H_{T,g,r} \quad (5.16)$$

Bei Berücksichtigung der Strahlenexposition durch radioaktive Tochternuklide ist gemäß Anhang 15 zu verfahren. Die Jahresdosis im Organ oder Gewebe T ergibt sich aus der Summe der Jahresdosisbeiträge für das primäre Radionuklid und den Jahresdosisbeiträgen der Tochternuklide.

5.5.1 Aktivität in Trinkwasser

Die Aktivitätskonzentration C_r^{W} des Radionuklids r im Trinkwasser in Bq · l^{-1} ergibt sich (ohne Berücksichtigung von Dekontaminationseffekten) zu:

$$C_r^{W} = C_r^{Fließ} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{W}) \quad (5.17)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

t_v^{W} : Zeit zwischen der Entnahme aus dem Fließgewässer und der Einspeisung in das Trinkwassernetz in s. Diese Verweilzeit ergibt sich aus der Art der Gewinnung und der Aufbereitung.

5.5.2 Aktivität in Fischfleisch

Die spezifische Aktivität C_r^{Fi} des Radionuklids r in Fischfleisch in Bq · kg^{-1} ergibt sich zu:

$$C_r^{Fi} = C_r^{Fließ} \cdot T_r^{Fi} \quad (5.18)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

T_r^{Fi} : Konzentrationsfaktor für das Radionuklid r im Fischfleisch in Bq · kg^{-1} pro Bq · l^{-1}, siehe Anhang 13

5.5.3 Aktivitätsberechnung für die Expositionspfade „Viehtränke“

Die spezifische Aktivität C_r^{Mi} des Radionuklids r in Milch in Bq · kg^{-1} ergibt sich zu:

$$C_r^{Mi} = C_r^{Fließ} \cdot L \cdot T_r^{Mi} \quad (5.19)$$

bzw. in Fleisch zu:

$$C_r^{Fl} = C_r^{Fließ} \cdot L \cdot T_r^{Fl} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Fl}) \quad (5.20)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

L : Täglicher Wasserkonsum der Kuh in l · d^{-1}, siehe Anhang 4

T_r^{Mi} : Transferfaktor von dem aufgenommenen Wasser zum Fleisch in d · kg^{-1}, siehe Anhang 6, Tabelle 1

T_r^{Fl} Transferfaktor von dem aufgenommenen Wasser zum Fleisch in d · kg^{-1}, siehe Anhang 6, Tabelle 1

t_v^{Fl} : Zeit zwischen Schlachten und Fleischverzehr in s, siehe Anhang 4

Die Aufnahme von C-14-Kohlendioxid im Tränkwasser ist nicht zu berücksichtigen.

5.5.4 Aktivitätsberechnung für die Expositionspfade „Beregnung“

Die spezifische Aktivität C_r^n in Weidepflanzen (n = Wd) bzw. pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse (n = Pf) oder in Blattgemüse (n = Bl) von beregneten Weiden bzw. Feldern ist wie folgt zu berechnen:

$$\mathbf{C_r^n = C_r^{Fließ} \cdot \left[\frac{W \cdot f_W}{Y^n \cdot \lambda_{eff,r}^{Pf}} \cdot \left(1 - \exp\left(-\lambda_{eff,r}^{Pf} \cdot t_W^n\right)\right) + \frac{W \cdot T_r^n \cdot t_R}{p^m \cdot \lambda_{eff,r}^{Bo} \cdot 365} \cdot \left(1 - \exp\left(-\lambda_{eff,r}^{Bo} \cdot t_b\right)\right)\right] \cdot \exp\left(-\lambda_r \cdot t_v^n\right)} \quad (5.21)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

W : Beregnungsrate in l · m^{-2} · s^{-1}, siehe Anhang 4

t_W^n : Zeit, in der Pflanzen während der Wachstumsperiode durch Beregnung oberirdisch kontaminiert werden, siehe Anhang 4

t_R : Zahl der Tage im Jahr, an denen beregnet wird, siehe Anhang 4

Anstelle von Gleichung (5.21) ist für Tritium in Form tritierten Wassers die spezifische Aktivität C_{H-3}^n in pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse, in Blattgemüse und in Weidepflanzen gleich der des Beregnungswassers $C_{H-3}^{Fließ}$ zu setzen.

Anstelle von Gleichung (5.21) ist die spezifische Aktivität von C-14 in pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse, in Blattgemüse und in Weidepflanzen wie folgt zu berechnen:

$$C_{C-14}^n = \frac{W \cdot C_{C-14}^{Fließ} \cdot f_C^n}{V_C} \quad (5.22)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

C_{C-14}^n : Spezifische Aktivität von C-14 in pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse (n = Pf), in Blattgemüse (n = Bl) und in Weidepflanzen (n = Wd) in Bq · kg^{-1} Pflanzen-Feuchtmasse

f_C^n : Massenanteil des Kohlenstoffs in Pflanzen, siehe Anhang 4

V_C : Assimilationsrate in kg · s^{-1} · m^{-2}, siehe Anhang 4

Die spezifische Aktivität in Milch (n = Mi) bzw. in Fleisch (n = Fl) in Bq · kg^{-1} ist nach Gleichung (5.23) zu berechnen:

$$C_r^n = C_r^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T_r^n \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^n) \quad (5.23)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

C_r^{Fu} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Futter in Bq · kg^{-1}. Die spezifische Aktivität $\mathbf{C_r^{Fu}}$ ergibt sich aus der Gleichung (3.15), wobei die spezifischen Aktivitäten in der Weidepflanze $\mathbf{C_r^{Wd}}$ und im Lagerfutter $\mathbf{C_r^{Lf}}$ nach den Gleichungen (5.21) und (5.22) zu berechnen sind. Für Tritium in Form tritiierten Wassers ist die spezifische Aktivität in Weidepflanzen $\mathbf{C_{H-3}^{Wd}}$ gleich der des Beregnungswassers $\mathbf{C_{H-3}^{Fließ}}$ zu setzen.

$\dot{M}_{Fu}$: Tägliche Aufnahme von Futter in kg Feuchtmasse · d^{-1}, siehe Anhang 4

t_v^n : Zeit zwischen Melken und Milchverzehr (n = Mi) bzw. Zeit zwischen Schlachten und Fleischverzehr (n = Fl) in s, siehe Anhang 4

5.5.5 Aktivitätsberechnung für die Expositionspfade „Landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten“

Die spezifische Aktivität C_r^n des Radionuklids r in Pflanzen bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Überschwemmungsgebieten ergibt sich zu:

$$C_r^n = C_r^{Fließ} \cdot K_e^r \cdot \ln 2 \cdot T_r^n \cdot \frac{1-\exp\left(-\lambda_{eff,r}^{Ü} \cdot t_{Se}\right)}{p^m \cdot \lambda_{eff,r}^{Ü}} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^n) \quad (5.24)$$

Die spezifische Aktivität des Radionuklids r in Milch C_r^{Mi}, die spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fleisch C_r^{Fl} bei der Nutzung von Überschwemmungsgebieten für Weidewirtschaft und die mittlere spezifische Aktivität im Futter C_r^{Fu} ergeben sich wie beim Luftpfad aus den Gleichungen (3.14) bis (3.16) mit C_r^{Wd} nach Gleichung (5.24).

5.6 Landwirtschaftliche Nutzung von Fluss- und Klärschlamm

Ausgehend von der spezifischen Aktivität im frischen Sediment bzw. der mittleren spezifischen Aktivität im Sediment oder im Klärschlamm sind die äußere Strahlenexposition durch den Schlamm und die innere Strahlenexposition durch den Aktivitätstransfer in Lebensmittel gemäß Anlage VII Teil B Tabelle 1 und Tabelle 3 StrlSchV zu berechnen. Dabei sind auch die örtlichen Gegebenheiten, die Häufigkeit der Auftragung, die Art der Schlammgewinnung und Aufbereitung (zum Beispiel Vermischung und Trocknung) und die Durchmischung mit dem Ackerboden zu berücksichtigen.

6 Inkrafttreten

Diese allgemeine Verwaltungsvorschrift tritt am ersten Tag des dritten auf die Veröffentlichung folgenden Monats in Kraft. Gleichzeitig tritt die allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung „Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ vom 21. Februar 1990 BAnz. Nr. 64a vom 31. März 1990) außer Kraft.

Der Bundesrat hat zugestimmt.

Berlin, den 28. August 2012

Die Bundeskanzlerin
Dr. Angela Merkel

Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Peter Altmaier

Redaktioneller Hinweis:
BfS bemüht sich, fehlerfreie Texte zur Verfügung zu stellen, übernimmt jedoch keine Haftung. Bei Rechtsakten sind die in den amtlichen Publikationsorganen des Bundes auf Papier veröffentlichten Fassungen verbindlich.

Anhang 1
Dosisleistungskoeffizienten für Betasubmersion $g_{\gamma,r,T}$ ($Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$)

Es sind die Dosisleistungskoeffizienten aus der im Bundesanzeiger vom 28. August 2001 bekannt gegebenen Zusammenstellung der Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition – Teil I – Dosisleistungskoeffizienten bei äußerer Strahlenexposition – zu verwenden.

Die Dosisleistungskoeffizienten sind jeweils ohne und mit Berücksichtigung von Folgenukliden (Tochternukliden) angegeben.

Bei der Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten mit Berücksichtigung der Tochternuklide ist eine Transportzeit zwischen Emissionsort und Dosisaufpunkt von 100 Sekunden berücksichtigt worden. Das hat zur Folge, dass der Dosisleistungskoeffizientenanteil von sehr kurzlebigen Mutter- und Tochternukliden nicht dem Gleichgewichtswert entspricht, sondern kleiner ist. Die angegebenen Dosisleistungskoeffizienten ohne Berücksichtigung der Tochternuklide berücksichtigen keinen radioaktiven Zerfall, die Transportzeit ist null.

Anhang 2
Dosisleistungskoeffizienten für Gammasubmersion $g_{\gamma,r,T}$ ($Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$) und für Bodenstrahlung $g_{b,r,T}$ ($Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$); Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammasubmersion und Bodenstrahlung.

Es sind die Dosisleistungskoeffizienten und die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen aus der im Bundesanzeiger vom 28. August 2001 bekannt gegebenen Zusammenstellung der Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition – Teil I – Dosisleistungskoeffizienten bei äußerer Strahlenexposition – zu verwenden.

Die Dosisleistungskoeffizienten in der oben genannten Zusammenstellung sind auf Referenzpersonen der Altersgruppe > 17 a bezogen.

Für Referenzpersonen der Altersgruppen ≤ 17 a sind wegen der geringeren Organabschirmung und der geringeren Körpergröße die jeweils genannten Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen anzuwenden.

Bei der Berechnung des Anteils der Tochternuklide am Dosisleistungskoeffizienten für Gammasubmersion ist eine Zerfallszeit des Mutternuklides von 200 Sekunden angenommen worden. Der Dosisleistungskoeffizient für Gammasubmersion mit Berücksichtigung der Tochternuklide setzt sich zusammen aus dem Dosisleistungskoeffizienten des Mutternuklids (ohne Berücksichtigung einer Zerfallszeit) und dem Anteil der Tochternuklide, die während der Zerfallszeit von 200 Sekunden gebildet worden sind.

Die Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten für Bodenstrahlung erfolgte unter Berücksichtigung der Beiträge der Tochternuklide nach einer 50 Jahre dauernden kontinuierlichen Ablagerung des Radionuklids r.

Die Dosisleistungskoeffizienten sind jeweils ohne und mit Berücksichtigung von Tochternukliden angegeben.

Der Faktor f für Gammasubmersion bezieht sich jeweils auf die Werte ohne Berücksichtigung von Tochternukliden.

Zerfällt ein Radionuklid ohne Gammastrahlung in einen Gammastrahler (z. B. Cs-137 – Ba-137m), so ist zusätzlich der Faktor f für das Tochternuklid zu berücksichtigen.

Anhang 3
Inhalationsdosiskoeffizienten $g_{h,r,T}$ ($Sv \cdot Bq^{-1}$) und Ingestionsdosiskoeffizienten $g_{g,r,T}$ ($Sv \cdot Bq^{-1}$)

Es sind die Dosiskoeffizienten aus der im Bundesanzeiger vom 28. August 2001 bekannt gegebenen Zusammenstellung der Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition – Teil II – Dosiskoeffizienten bei innerer Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung – zu verwenden.

Für C-14 ist der Inhalationsdosiskoeffizient für CO_2 bzw. der Ingestionsdosiskoeffizient für organische Verbindungen anzuwenden.

Bei Unkenntnis der Lungenretentionsklasse bzw. der Ingestionsklasse der Radionuklidverbindung ist den Berechnungen der Dosis die ungünstigste Klasse zugrunde zu legen, das heißt die Klasse, die den höchsten Dosisbeitrag für das betreffende Organ bzw. Gewebe ergibt. Der Berechnung der effektiven Dosis ist für jedes Radionuklid die Retentions- bzw. Resorptionsklasse zugrunde zu legen, bei der der höchste Dosiskoeffizient für die effektive Dosis vorliegt.

Anhang 4
Werte zur Berechnung des Radionuklidtransports über den Ingestionspfad und den Sedimentpfad

Tabelle

Symbol	Definition	Wert
C_C^L	mittlere Kohlenstoffkonzentration der Luft	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$ kg · m^{-3}
f_C^n	Massenanteil des Kohlenstoffs in n = Pf, Bl (pflanzliche Produkte und Blattgemüse), n = Wd (Weidepflanzen)	 0,18 0,09
f_H^{Pf}	Anteil des Wassers an der gesamten Pflanzenmasse	0,8
f_L	Anteil des Tritiuminventars in der Pflanze, der aus der Luftfeuchte stammt	0,3
f_N	Anteil des Tritiuminventars in der Pflanze, der aus Niederschlägen stammt	0,7
f_P	Bruchteil des Jahres, in dem die Tiere auf der Weide grasen	0,5
f_U	Uferfaktor: a) oberhalb der Tidegrenze (Aufenthalt am Flussufer) b) unterhalb der Tidegrenze (Aufenthalt auf trockengefallenen Flusssedimenten)	 0,2 1,0
f_W	Anteil der auf der Pflanze abgelagerten Aktivität bei Niederschlägen und bei Beregnung	0,3
$\overline{\Psi}^S$	mittlere absolute Luftfeuchte während der Wachstumszeit	0,009 kg · m^{-3}
L	täglicher Wasserkonsum des Rindviehs	75 l · d^{-1}
$\lambda_{Anl,r}$	Anlagerungskonstante des Radionuklids r in s^{-1}, siehe Anhang 14 Elementgruppe 1: Elementgruppe 2: Elementgruppe 3:	 ∞ $5 \cdot 10^{-6}$ s^{-1} $3 \cdot 10^{-6}$ s^{-1}
$\lambda_{eff,r}^{Bo}$	effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r im Wurzelbereich der Pflanzen $= \lambda_{M,r} + \lambda_r$	
λ_r	physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r in s^{-1}	
$\lambda_{M,r}$	Verweilkonstante der Radionuklide aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten - für Tc - für Sr, Ru, I - für Cs - für Aktiniden Nicht aufgeführte Elemente sind aufgrund ihrer chemischen Verwandtschaft zu angegebenen Elementen oder aufgrund von Literaturwerten in die entsprechende Gruppe einzuordnen. Ansonsten sind sie der Gruppe der Aktiniden zuzuordnen.	 Acker / Weide 10^{-8} s^{-1} / $2{,}0 \cdot 10^{-8}$ s^{-1} 10^{-9} s^{-1} / $2{,}0 \cdot 10^{-9}$ s^{-1} 10^{-10} s^{-1} / $2{,}0 \cdot 10^{-10}$ s^{-1} 10^{-11} s^{-1} / $2{,}0 \cdot 10^{-11}$ s^{-1}
$\lambda_{eff,r}^{Pf}$	effektive Verweilkonstante des Radionuklids r für das Verbleiben auf der Vegetation $= \lambda_V + \lambda_r$	
λ_V	Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Vegetation (Halbwertszeit 14 Tage)	$5{,}7 \cdot 10^{-7}$ s^{-1}
$\lambda_{eff,r}^{Ü}$	effektive Verweilkonstante des Radionuklids r in Überschwemmungsgebieten $= \lambda_Ü + \lambda_r$	

Symbol	Definition	Wert
$\lambda_{Ü}$	Abbaukonstante zur Berücksichtigung des Eindringens der Radionuklide in tiefere Bodenschichten in Überschwemmungsgebieten	$3 \cdot 10^{-9}$ s^{-1}
$\dot{M}_{Fu}$	tägliche Aufnahme von Weidefutter für Rindvieh (Feuchtmasse)	65 kg · d^{-1}
p^m	Flächentrockenmasse des Bodens m = A für Ackerboden (Pflugschartiefe 20 cm): p^A m = Wd für Weideboden (10 cm Tiefe): p^{Wd}	 280 kg · m^{-2} 120 kg · m^{-2}
ρ_{Se}	Dichte des Sediments (Trockenmasse)	700 kg · m^{-3}
ρ_{Sp}	Dichte des Spülfeldbodens (Trockenmase)	1200 kg· m^{-3}
ρ_W	Dichte des Wassers	1 kg · l^{-1}
t_a	Zeit zwischen zwei Ausbaggerungen in s	ortsspezifisch
t_b	Zeit, in der sich die Radionuklide auf dem Boden ablagern (50 Jahre)	$1{,}57 \cdot 10^9$ s
t_e^n	Zeit, in der Pflanzen während der Wachstumsperiode der Abluftfahne ausgesetzt sind n = Pf für pflanzliche Produkte ohne Blattgemüse ($\mathbf{t_e^{Pf}}$ = 60 Tage) n = Bl für Blattgemüse ($\mathbf{t_e^{Bl}}$ = 60 Tage) n = Wd für Weidepflanzen ($\mathbf{t_e^{Wd}}$ = 30 Tage)	 $5{,}2 \cdot 10^6$ s $5{,}2 \cdot 10^6$ s $2{,}6 \cdot 10^6$ s
t_R	Zahl der Tage im Jahr, an denen beregnet wird	180
t_{Se}	maximale Sedimentationsdauer in s (50 Jahre)	$1{,}57 \cdot 10^9$ s
t_{Sp}	Zeit zwischen dem Aufspülen eines Spülfeldes und der Begehbarkeit (ca. 3 Jahre)	10^8 s
t_v^n	Zeit zwischen Produktion und Verbrauch von Nahrungs- bzw. Futtermitteln n = Wd Zeit zwischen Ernte und Verzehr von Weidepflanzen ($\mathbf{t_v^{Wd}}$ = 0 Tage) n = Lf Zeit zwischen Ernte und Verzehr von Lagerfutter ($\mathbf{t_v^{nLf}}$ = 90 Tage) n = Bl Zeit zwischen Ernte und Verzehr von gartenfrischem Blattgemüse ($\mathbf{t_v^{Bl}}$ = 0 Tage) n = Pf Zeit zwischen Ernte und Verzehr von gelagertem Gemüse, pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse ($\mathbf{t_v^{Pf}}$ = 60 Tage) n = Mi Zeit zwischen Melken und Milchverzehr ($\mathbf{t_v^{Mi}}$ = 0 Tage) n = Fl Zeit zwischen Schlachten und Fleischverzehr ($\mathbf{t_v^{Fl}}$ = 20 Tage) n = W Zeit zwischen Entnahme aus den Fließgewässern und der Einspeisung in das Trinkwassernetz t_v^W in s	 0 s $7{,}8 \cdot 10^6$ s 0 s $5{,}2 \cdot 10^6$ s 0 s $1{,}7 \cdot 10^6$ s ortsspezifisch

Symbol	Definition	Wert
t_W^n	Zeit in der Pflanzen während der Wachstumsperiode durch Beregnung oberirdisch kontaminiert werden	
	n = Wd Zeit bis zum erneuten Abweiden desselben Weidestücks ($\mathbf{t_W^{Wd}}$ = 30 Tage)	$2{,}6 \cdot 10^6$ s
	n = Pf,Bl mittlere Vegetationszeit von pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse und von Blattgemüse ($\mathbf{t_W^{Pf}}$ = $\mathbf{t_W^{Bl}}$= 60 Tage)	$5{,}2 \cdot 10^6$ s
U_r	effektive Schichtdicke zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung bis zu Gamma-Energien von 1,5 MeV	0,05 m
V_C	Assimilationsrate für Kohlenstoff	10^{-7} kg · m^{-2} · s^{-1}
v_{Se}	mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit (ca. 0,65 cm pro Jahr)	$2{,}1 \cdot 10^{-10}$ l · m · s^{-1}
W	Beregnungsrate während der Weidezeit und der Wachstumszeit von pflanzlichen Produkten (1 l · m^{-2} · d^{-1})	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$ l · m^{-2} · s^{-1}
Y^n	Ertrag bzw. Bewuchsdichte (Feuchtmasse)	
	n = Bl Ertrag von Blattgemüse Y^{Bl}	1,6 kg · m^{-2}
	n = Pf Ertrag von pflanzlichen Produkten ohne Blattgemüse Y^{Pf}	2,4 kg · m^{-2}
	n = Wd Bewuchsdichte von Weidepflanzen Y^{Wd}	0,85 kg · m^{-2}

Anhang 5
Lebensgewohnheiten der Referenzperson

Zur Ermittlung der Strahlenexposition für die Referenzpersonen sind nach Anlage VII Teil B StrlSchV die folgenden Werte der mittleren jährlichen Verzehrmengen (Ernährungsgewohnheiten), der Atemrate und der Aufenthaltszeiten zugrunde zu legen:

Tabelle 1:

Mittlere jährliche Verzehrsmengen der Referenzpersonen (kg)

1	2	3	4	5	6	7	8
Altersgruppe Lebensmittel	≤ 1 Jahr	> 1 - ≤ 2 Jahre	> 2 - ≤ 7 Jahre	> 7 - ≤ 12 Jahre	> 12 - ≤ 17 Jahre	> 17 Jahre	
Trinkwasser	55 [5)]	100	100	150	200	350	2
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser	200 [5,6)]	–	–	–	–	–	1,6
Milch, Milchprodukte	45	160	160	170	170	130	3
Fisch [7)]	0,5	3	3	4,5	5	7,5	5
Fleisch, Wurst, Eier	5	13	50	65	80	90	2
Getreide, Getreideprodukte	12	30	80	95	110	110	2
einheimisches Frischobst, Obstprodukte, Säfte	25	45	65	65	60	35	3
Kartoffeln, Wurzelgemüse, Säfte	30	40	45	55	55	55	3
Blattgemüse	3	6	7	9	11	13	3
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	5	17	30	35	35	40	3

[5)] Zur jährlichen Trinkwassermenge des Säuglings von 55 kg kommen 160 kg hinzu, wenn angenommen wird, dass der Säugling nicht gestillt wird, sondern nur Milchfertigprodukte erhält, die überregional erzeugt werden und als nicht kontaminiert anzusetzen sind. Dabei wird angenommen, dass 0,2 kg Konzentrat (entspricht 1 l Milch) in 0,8 l Wasser aufgelöst werden.

[6)] Je nach Nuklidzusammensetzung ist die ungünstigste Ernährungsvariante zugrunde zu legen.

[7)] Der Anteil von Süßwasserfisch am Gesamtfischverzehr beträgt im Mittel ca. 17% und ist den regionalen Besonderheiten anzupassen.

Zur Berücksichtigung der 95 %-Perzentile der jährlichen Verzehrmengen der Referenzpersonen sind die mittleren jährlichen Verzehrmengen mit den Faktoren der Spalte 8 zu multiplizieren. In Bezug auf den Verzehr von Muttermilch und Säuglingsmilch (Milchfertigprodukte mit Trinkwasser) während des ersten Lebensjahres ist es sinnvoll, zwei signifikante Stellen für den Faktor in Spalte 8 anzugeben. Dies gilt nicht für die übrigen Lebensmittelgruppen, bei denen die Faktoren in Spalte 8 alle sechs Altersgruppen abdecken.

Tabelle 2

Altersgruppe	≤ 1 Jahr	> 1 - ≤ 2 Jahre	> 2 - ≤ 7 Jahre	> 7 - ≤ 12 Jahre	> 12 - ≤ 17 Jahre	> 17 Jahre
Atemrate ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$	$6{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$	$2{,}3 \cdot 10^{-4}$	$2{,}6 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 3

Aufenthaltszeiten	Dauer
Expositionspfade	
a) Betastrahlung innerhalb der Abluftfahne	1 Jahr
b) Gammastrahlung aus der Abluftfahne	1 Jahr
c) Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe	1 Jahr
d) Inhalation radioaktiver Stoffe	1 Jahr
e) Aufenthalt auf Sediment	1000 Stunden

Anhang 6

Tabelle 1
Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes

Ist aufgrund standortspezifischer Besonderheiten die Annahme begründet, dass andere Transferfaktoren Boden/Pflanze (T_r^{Pf}) oder Boden/Weidepflanze (T_r^{Wd}) vorliegen, so sind diese so zugrunde zu legen, dass bei dem Gesamtergebnis eine Unterschätzung der Strahlenexposition nicht zu erwarten ist. ·

Element	T_r^{Wd} in $\frac{Bq/kgFM}{Bq/kgTM}$ [9]) (–)	T_r^{Pf} in $\frac{Bq/kgFM}{Bq/kgTM}$ [9]) (–)	T_r^{Mi} [8]) in (d/kg Milch)	T_r^{Fl} in (d/kg Fleisch)
H	– [10])	– [10])	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Be	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
C	– [10])	– [10])	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
F	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Na	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
Mg	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Al	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Si	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
P	$5 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{0}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
S	$9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Cl	$5 \cdot 10^{0}$	$5 \cdot 10^{0}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
K	$1 \cdot 10^{0}$	$1 \cdot 10^{0}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Ca	$2 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Sc	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$
V	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Cr	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Mn	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Fe	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Co	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Ni	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Cu	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Zn	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Ga	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Ge	$2 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-1}$
As	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$

[8]) Für diesen Transferfaktor wird in der Literatur üblicherweise die Einheit d/l verwendet.
[9]) **FM = Feuchtmasse**
TM = Trockenmasse
[10]) Entfällt, Berechnung erfolgt nach dem spezifischen Aktivitätsmodell.

Element	T_r^{Wd} in $\frac{Bq/kgFM}{Bq/kgTM}$ [9] (–)	T_r^{Pf} in $\frac{Bq/kgFM}{Bq/kgTM}$ [9] (–)	T_r^{Mi} [8] in (d/kg Milch)	T_r^{Fl} in (d/kg Fleisch)
Se	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Br	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Rb	$9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Sr	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Y	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Zr	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Nb	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-1}$
Mo	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
Tc	$3 \cdot 10^{0}$	$3 \cdot 10^{0}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Ru	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Rh	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Pd	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Ag	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Cd	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
In	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Sn	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$
Sb	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Te	$2 \cdot 10^{0}$	$2 \cdot 10^{0}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-2}$
I	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Cs	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Ba	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
La	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Ce	$9 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Pr	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Nd	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Pm	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Sm	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Eu	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Gd	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Tb	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Dy	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Ho	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$

Element	T_r^{Wd} in $\frac{Bq/kgFM}{Bq/kgTM}$ [9]) (–)	T_r^{Pf} in $\frac{Bq/kgFM}{Bq/kgTM}$ [9]) (–)	T_r^{Mi} [8]) in (d/kg Milch)	T_r^{Fl} in (d/kg Fleisch)
Er	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Tm	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Yb	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Lu	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Hf	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-1}$
Ta	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-1}$
W	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Re	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Os	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-1}$
Ir	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Pt	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Au	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Hg	$7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-1}$
Tl	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Pb	$1 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Bi	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Po	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
At	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Ra	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$
Ac	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Th	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Pa	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$
U	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Np	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Pu	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Am	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Cm	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Bk	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Cf	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 2
Transferfaktoren zur Berechnung des Übergangs inkorporierter Radionuklide in die Muttermilch

Ist aufgrund spezifischer Besonderheiten die Annahme begründet, dass für den Übergang inkorporierter Aktivität in die Muttermilch andere Transferfaktoren für den Ingestionspfad ($\mathbf{T_r^{MM,g}}$) oder den Inhalationspfad ($\mathbf{T_r^{MM,h}}$) vorliegen, so sind diese so zugrunde zu legen, dass bei dem Gesamtergebnis eine Unterschätzung der Strahlenexposition nicht zu erwarten ist. Die Produkte aus den Transferfaktoren und der täglichen Verzehrmenge an Muttermilch dürfen den Wert 1 nicht überschreiten

Element	$T_r^{MM,g}$ [11]) (d · kg^{-1} Muttermilch)	$T_r^{MM,h}$ [11]) (d · kg^{-1} Muttermilch)
H	0,5	0,2 [12]) / 0,5 [13])/ 0,005 [14]) / 5 · 10^{-5} [15])
Be	0,006	0,1
C	0,3	0,1 [12,16]) / 0,3 [17])
F	0,02	0,007
Na	0,05	0,02
Mg	0,1	0,06
Al	0,02	0,3
Si	0,2	0,3
P	0,1	0,04
S	0,2	0,07 [18]) / 0,2 [19,20])
Cl	0,08	0,03
K	0,2	0,07
Ca	0,4	0,3
Sc	0,1	0,01
V	0,04	0,3
Cr	0,2	0,3
Mn	0,002	0,005
Fe	0,04	0,1
Co	0,1	0,3
Ni	0,3	0,3 [12]) / 1 [21])
Cu	0,2	0,1
Zn	0,2	0,1
Ga	0,02	0,3
Ge	1	0,4
As	0,1	0,04
Se	0,3	0,1

[11]) Für diesen Transferfaktor wird in der Literatur üblicherweise die Einheit d/l verwendet.
[12]) Schwebstoffe
[13]) HTO und OBT
[14]) Tritiiertes Methan
[15]) Elementares Tritium
[16]) CO
[17]) CO_2 und Kohlenstoffdampf
[18]) Schwebstoffe (anorganisch)
[19]) Cs_2
[20]) SO_2
[21]) Nickelcarbonyl

Element	$T_r^{MM,g}$ [11]) (d · kg^{-1} Muttermilch)	$T_r^{MM,h}$ [11]) (d · kg^{-1} Muttermilch)
Br	0,07	0,03
Rb	0,4	0,1
Sr	0,1	0,09
Y	0,02	0,1
Zr	0,07	0,3
Nb	0,02	0,3
Mo	0,03	0,01
Tc	0,6	0,4
Ru	0,03	0,2 [12]) / 0,6 [22])
Rh	0,3	0,3
Pd	0,3	0,3
Ag	0,2	0,3
Cd	0,2	0,3
In	0,02	0,3
Sn	0,004	0,05
Sb	0,04	0,1
Te	0,4	0,3 [12]) / 1 [23])
I	0,6	0,2 [12]) / 0,6 [24]) / 0,4 [25])
Cs	0,3	0,1
Ba	0,02	0,03
La	0,03	0,3
Ce	0,03	0,3
Pr	0,03	0,1
Nd	0,03	0,1
Pm	0,03	0,1
Sm	0,03	0,1
Eu	0,03	0,1
Gd	0,03	0,3
Tb	0,03	0,1
Dy	0,03	0,1
Ho	0,03	0,1
Er	0,03	0,1
Tm	0,03	0,1
Yb	0,03	0,1
Lu	0,03	0,1
Hf	0,002	0,3

[22]) Ruthentetroxid
[23]) Elementares Tellur
[24]) Elementares Jod
[25]) Methyljodid

Element	$T_r^{MM,g}$ [11]) (d · kg^{-1} Muttermilch)	$T_r^{MM,h}$ [11]) (d · kg^{-1} Muttermilch)
Ta	0,001	0,1
W	0,4	0,3
Re	0,9	0,4
Os	0,1	0,3
Ir	0,1	0,3
Pt	0,1	0,3
Au	0,1	0,3
Hg	0,2	0,3 [18]) / 0,8 [26]) / 0,1 [27])
Tl	1	0,4
Pb	0,2	0,3
Bi	0,06	0,3
Po	0,6	0,3
At	1	0,4
Ra	0,2	0,3
Ac	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Th	0,02	0,3
Pa	$6 \cdot 10^{-4}$	0,1
U	0,02	0,2
Np	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Pu	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Am	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Cm	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Bk	$6 \cdot 10^{-4}$	0,1
Cf	$6 \cdot 10^{-4}$	0,1

[26]) Quecksilberdampf
[27]) Schwebstoffe (organisch)

Anhang 7

Tabelle 1

Ausbreitungskoeffizienten p_y und p_z und Ausbreitungsexponenten q_y und q_z in Abhängigkeit von Diffusionskategorie und Emissionshöhe

effektive Emissionshöhe H	Diffusionskategorie	Ausbreitungskoeffizient bzw. Ausbreitungsexponent			
		p_y	q_y	p_z	q_z
50 Meter	A	1,503	0,833	0,151	1,219
	B	0,876	0,823	0,127	1,108
	C	0,659	0,807	0,165	0,996
	D	0,640	0,784	0,215	0,885
	E	0,801	0,754	0,264	0,774
	F	1,294	0,718	0,241	0,662
100 Meter	A	0,170	1,296	0,051	1,317
	B	0,324	1,025	0,070	1,151
	C	0,466	0,866	0,137	0,985
	D	0,504	0,818	0,265	0,818
	E	0,411	0,882	0,487	0,652
	F	0,253	1,057	0,717	0,486
180 Meter	A	0,671	0,903	0,0245	1,500
	B	0,415	0,903	0,0330	1,320
	C	0,232	0,903	0,104	0,997
	D	0,208	0,903	0,307	0,734
	E	0,345	0,903	0,546	0,557
	F	0,671	0,903	0,484	0,500

Für effektive Emissionshöhen kleiner als 50 m ist der Datensatz für 50 m, für effektive Emissionshöhen größer als 180 m derjenige für 180 m anzuwenden. Für effektive Emissionshöhen zwischen 50 m und 100 m sowie zwischen 100 m und 180 m erfolgt eine geometrische Interpolation zwischen den tabellierten Werten von p_j und eine lineare Interpolation zwischen den tabellierten Werten von q_j.

Es ist:

$$q_{i,j} = \frac{(H_i - H_u)\cdot q_{j,o} + (H_o - H_i)\cdot q_{j,u}}{H_o - H_u}$$

$$p_{j,i} = p_{j,0}\left(\frac{H_i - H_u}{H_o - H_u}\right) \cdot p_{j,u}\left(\frac{H_o - H_i}{H_o - H_u}\right)$$

Hierin bedeuten:

$p_{j,i}$, $q_{j,i}$: Koeffizienten und Exponenten für σ_j für die effektive Emissionshöhe H_i zwischen H_o und H_u

H_i : effektive Emissionshöhe zwischen den Basishöhen in m

H_u : untere Basishöhe in m

H_o : obere Basishöhe in m

$p_{j,o}$, $q_{j,o}$: Koeffizienten und Exponenten für σ_j für die Basishöhe H_o

$p_{j,u}$, $q_{j,u}$: Koeffizienten und Exponenten für σ_j für die Basishöhe H_u

Tabelle 2
Exponent m_j des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils und maximale vertikale Ausbreitungsparameter in m

Diffusionskategorie	A	B	C	D	E	F
m_j	0,09	0,20	0,22	0,28	0,37	0,42
$\sigma_{z,max}$	1100	1100	800	800	–	–

Tabelle 3
Proportionalitätsfaktoren für Fallout v_g und für Washout c sowie Washoutkoeffizienten Λ_0

Emittierte Substanz	v_g (m • s^{-1})	c (a • mm^{-1} • s^{-1})	Λ_0 (s^{-1})
elementares Jod	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-5}$
organisch gebundenes Jod	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-11}$	$7 \cdot 10^{-7}$
tritiiertes Wasser	–	$4 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Schwebstoffe	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Bei der Emission von I-131 aus Kernkraftwerken ist davon auszugehen, dass maximal 50 % des I-131 in elementarer Form vorliegen.

Dosisaufbaufaktor für Gammasubmersion

Für den Dosisaufbaufaktor in Luft ohne Einfluss des Bodens für die Energie 1 MeV ist folgende Näherungsformel anzuwenden:

$$B_1(\mu_1 \cdot R) = 1 + \sum_{m=1}^{5} b_{1,m} \cdot (\mu_1 \cdot R)^m$$

mit

$\mu_1 = 7,78 \cdot 10^{-3}\ m^{-1}$

Die Koeffizienten $b_{1,m}$ sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4
Koeffizienten $b_{1,m}$ zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1 MeV

$b_{1,m}$				
m = 1	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5
$7,7 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$-8,2 \cdot 10^{-5}$

Diese Koeffizienten gelten für den Bereich $\mu_1 \cdot R < 15$, für größere $\mu_1 \cdot R$ kann $B_1 = B_1(15)$ gesetzt werden.

Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion

Der Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion ist nach folgender Näherungsformel zu berechnen:

$$K_1(\mu_1 \cdot z', \mu_1 \cdot s) \approx \sum_{k=0}^{3} \sum_{m=0}^{3} a_{k,m} (\mu_1 \cdot z')^k \cdot \exp\left(-\frac{m}{2} \cdot \mu_1 \cdot s\right)$$

Die Koeffizienten $a_{k,m}$ für die Energie 1 MeV sind in Tabelle 5 angegeben.

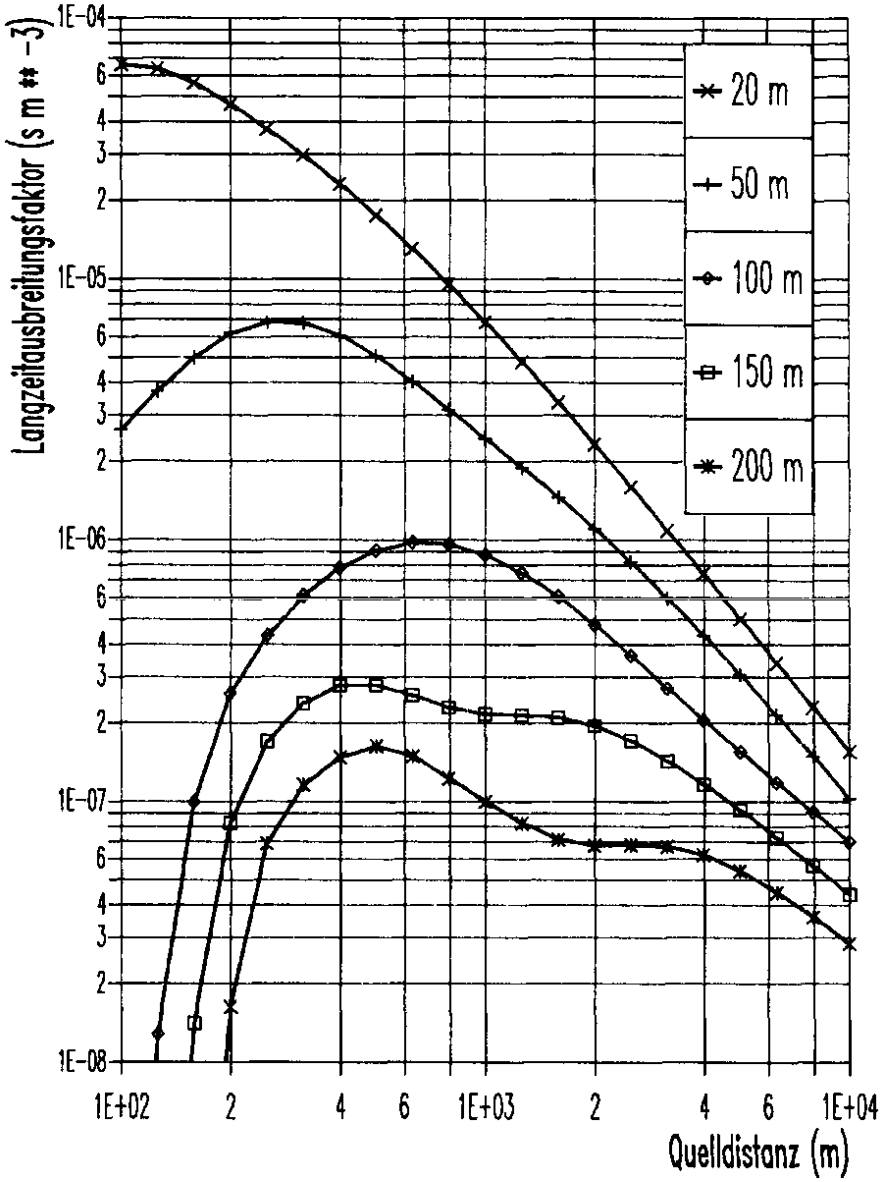
Tabelle 5
Koeffizienten $a_{k,m}$ zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion

E_γ = 1 MeV	m = 0	m = 1	m = 2	m = 3
k = 0	0,485	0,064	1,705	-1,179
1	0,137	1,878	-4,817	2,883
2	-0,0035	-0,8569	2,0527	-1,2552
3	-0,0018	0,0997	-0,2392	0,1503

Anhang 8
Diagramm zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors

Langzeitausbreitungsfaktor $\bar{\chi}^{G}$ für verschiedene effektive Emissionshöhen, Windrichtungshäufigkeit 100 % im 30°-Sektor, 1969 bis 1986.

Abb. 1



Anhang 9
Diagramme zur vereinfachten Ermittlung des Kurzzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion

Kurzzeitausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion in Emissionshöhe für die Diffusionskategorien A bis F bei einer Windgeschwindigkeit von u = 1 m · s^{-1} und einer Photonenenergie von 1 MeV.

Abb. 1

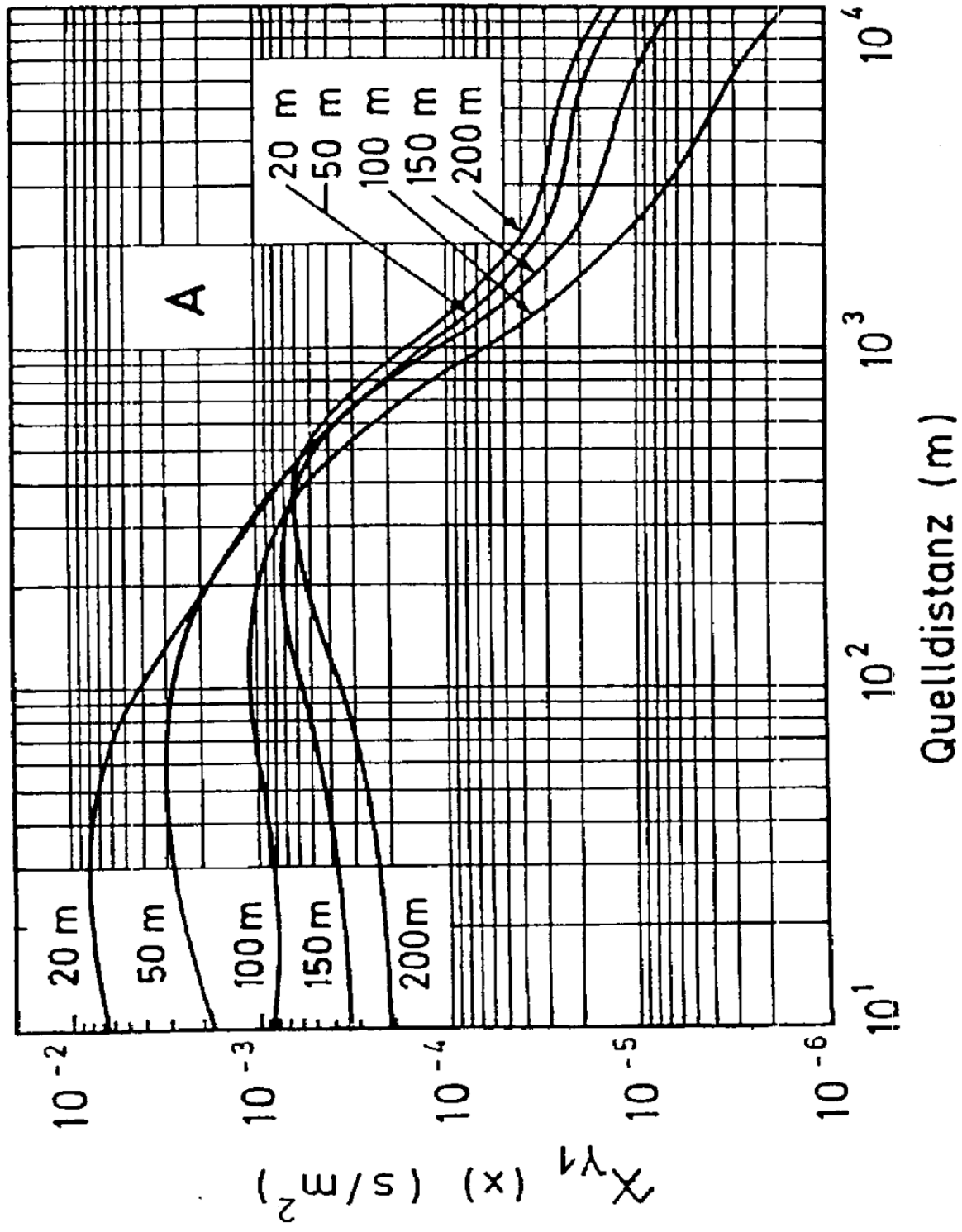


Abb. 2

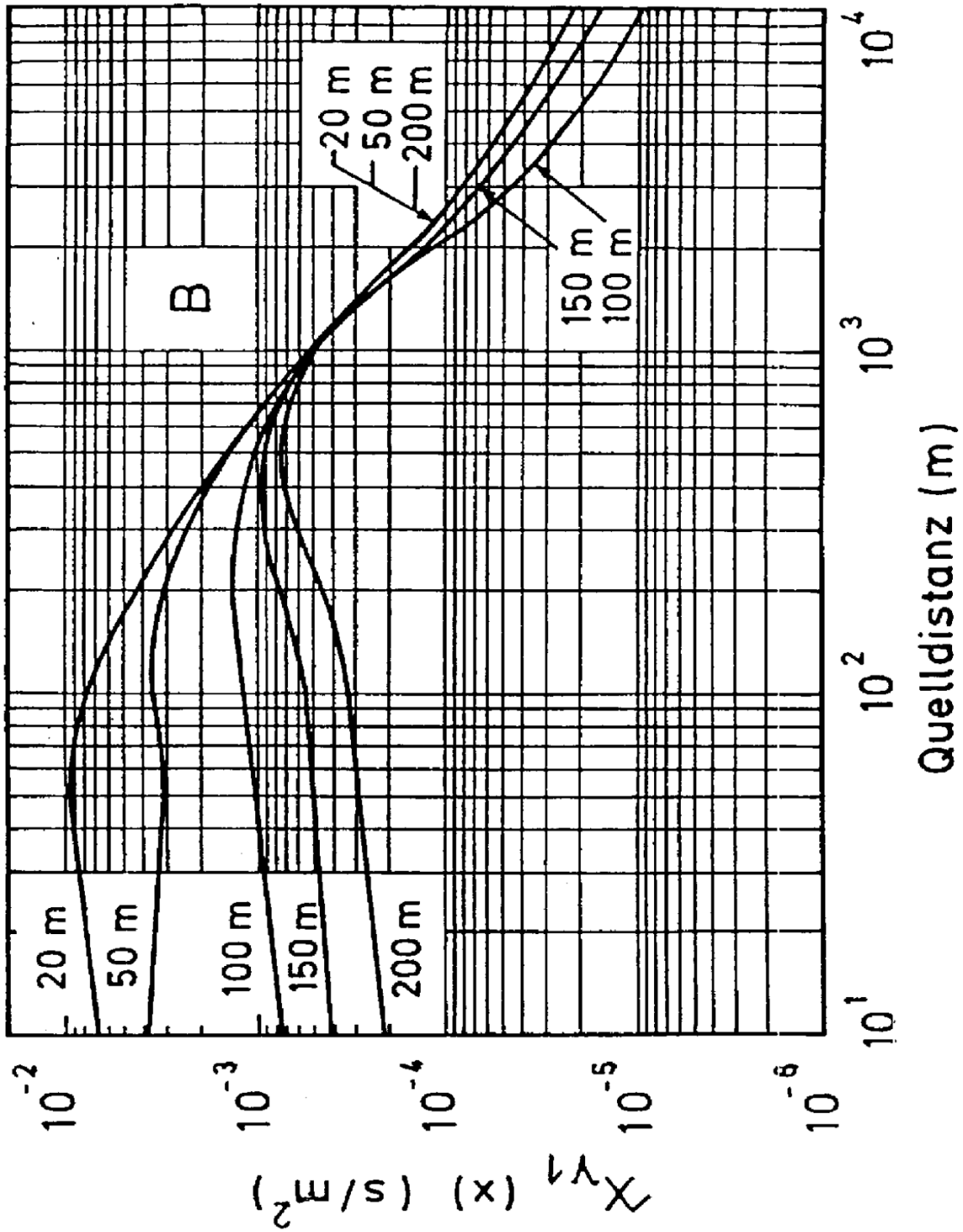

B
20 m
50 m
200 m
150 m
100 m
20 m
50 m
100 m
150 m
200 m
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
χ_{v1} (x) (s/m²)
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Quelldistanz (m)

Abb. 3

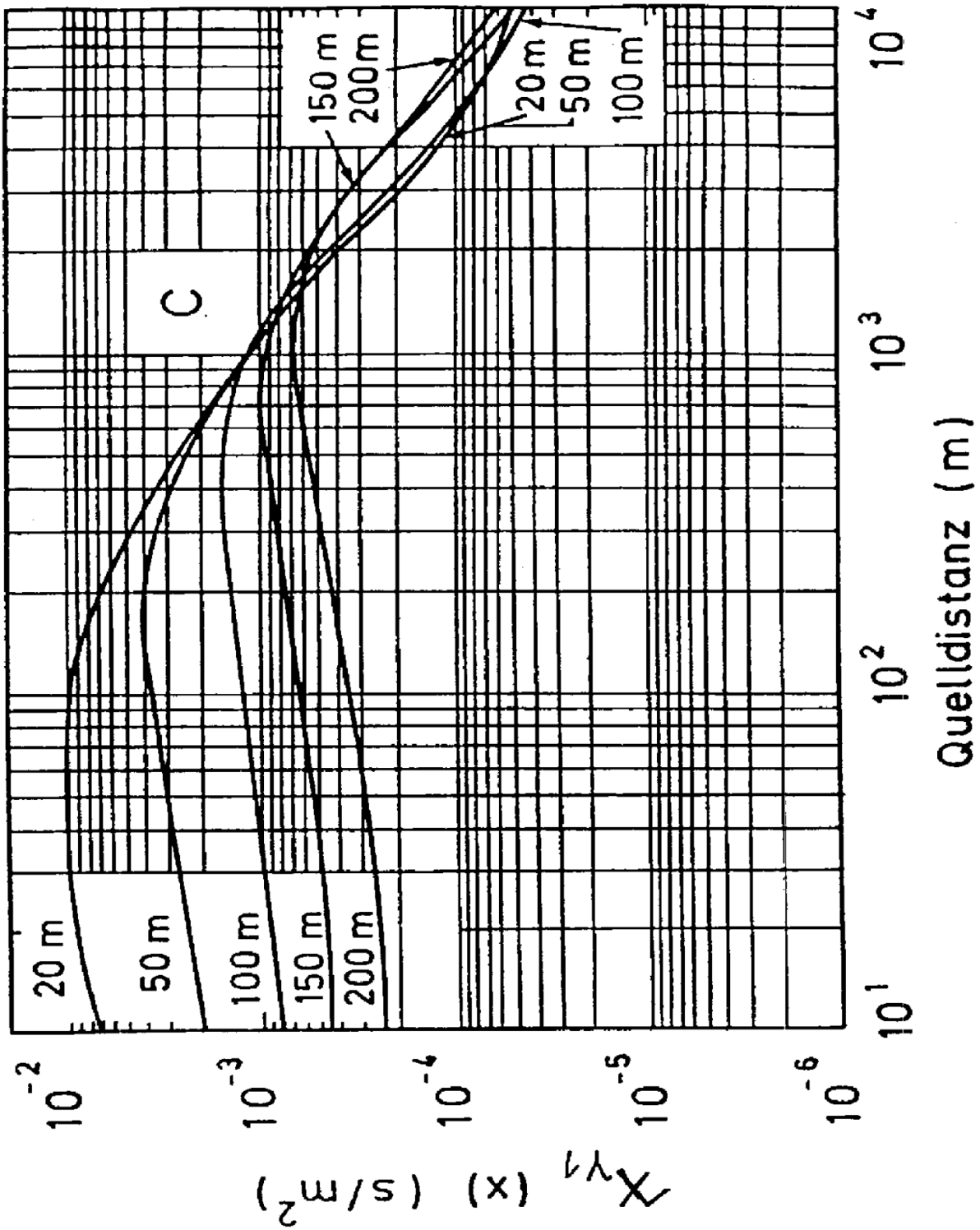

C
150 m
200m
20 m
50 m
100 m
20 m
50 m
100 m
150 m
200 m
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Quelldistanz (m)
χ_{v_1} (x) (s/m²)

Abb. 4

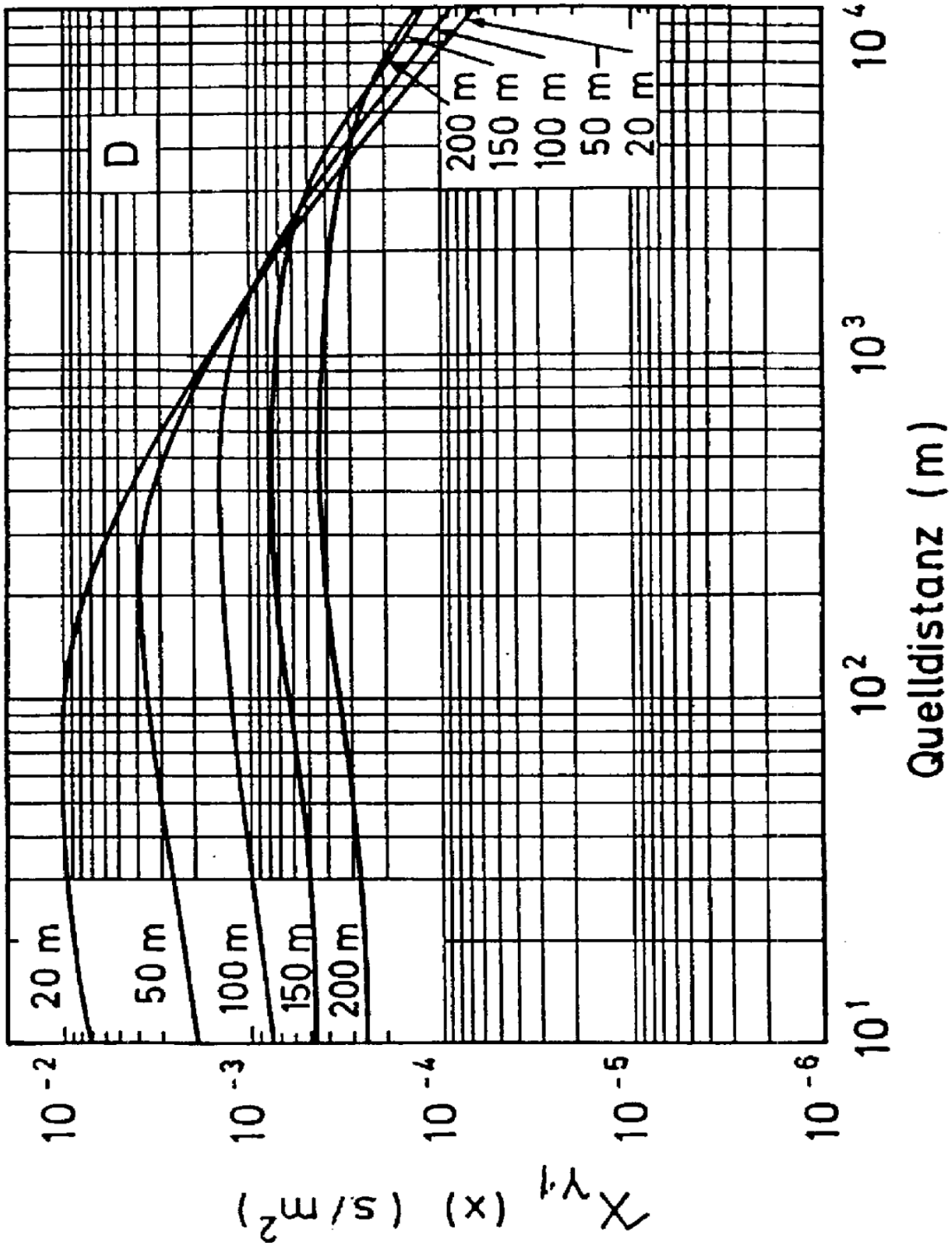

D
200 m
150 m
100 m
50 m
20 m
20 m
50 m
100 m
150 m
200 m
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Quelldistanz (m)
χ_{v_1} (x) (s/m²)

Abb. 5

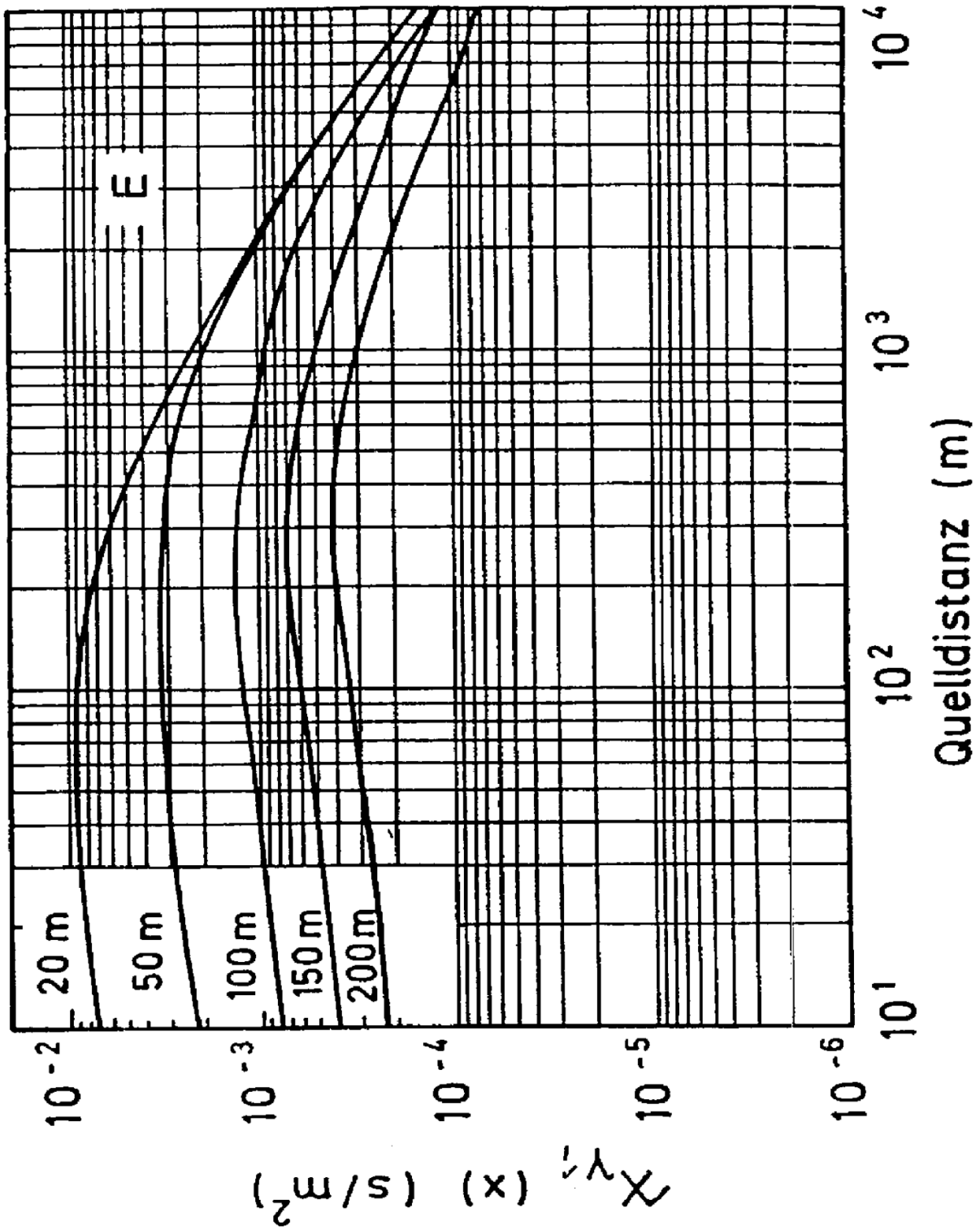
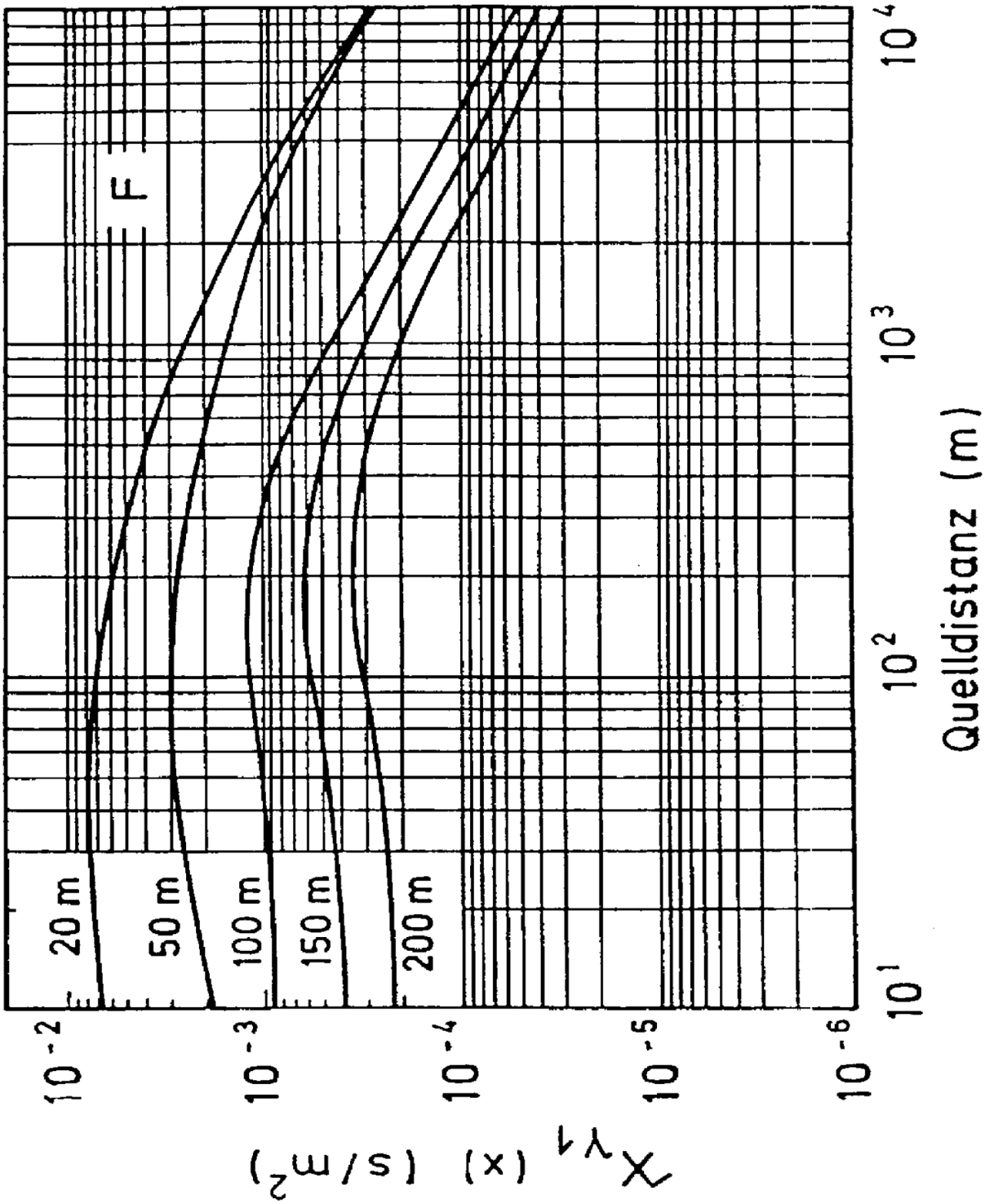

E
20 m
50 m
100 m
150 m
200 m
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
χ_{v_i} (x) (s/m²)
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Quelldistanz (m)

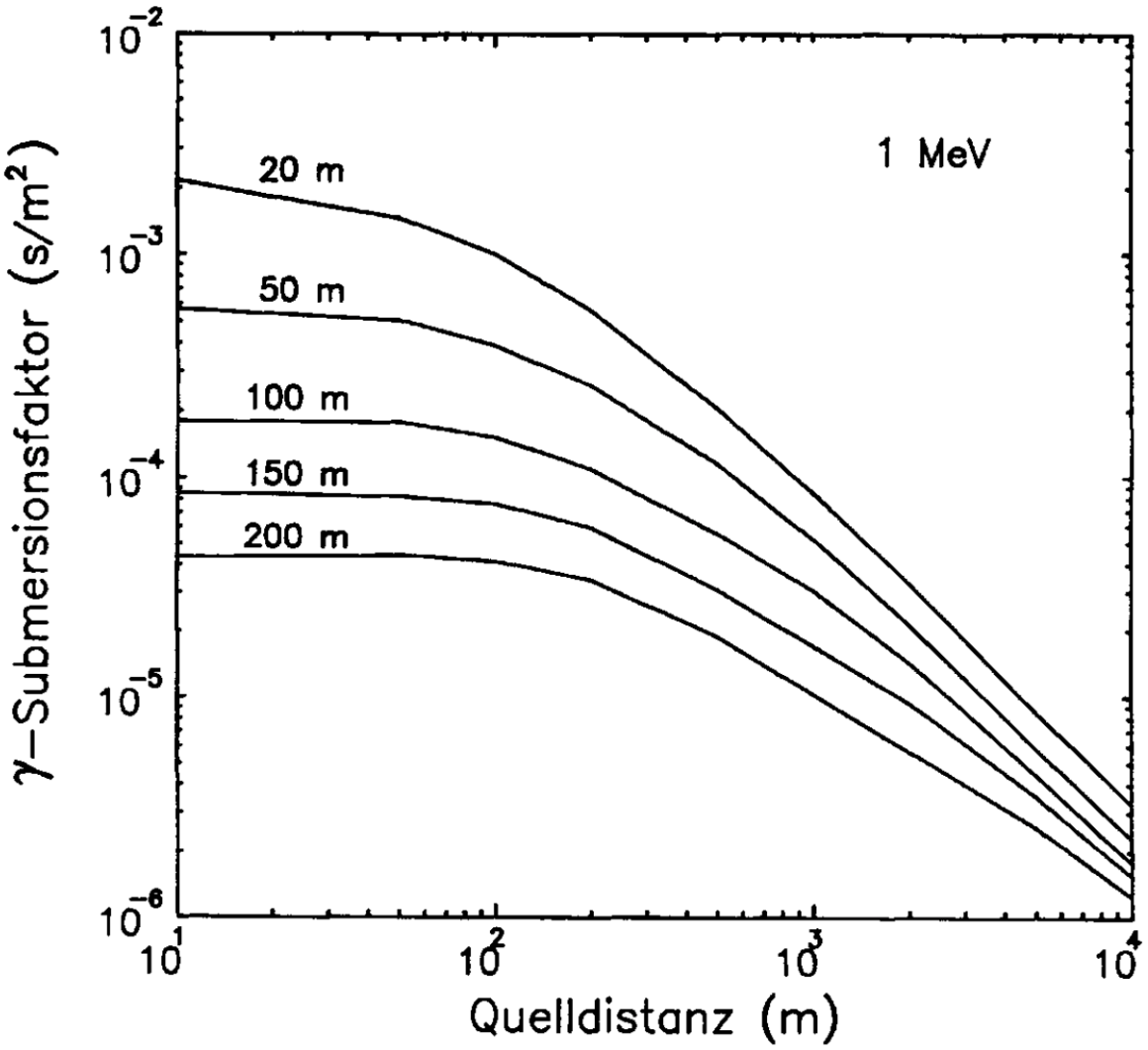
Abb. 6


F
20 m
50 m
100 m
150 m
200 m
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Quelldistanz (m)
χ_{v_1} (x) (s/m²)

Anhang 10
Diagramm zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion

Langzeitausbreitungsfaktor für Gammasubmersion für die Hauptausbreitungsrichtung (20 %) bezogen auf den 30°-Sektor in Abhängigkeit von der effektiven Emissionshöhe H mit Berücksichtigung des Einflusses der Nachbarsektoren; Gammaenergie 1 MeV.

Abb. 1



Anhang 11
Radionuklidgemische für Ableitungen mit Luft

Für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren ist von folgenden Modellgemischen für die emittierten Radionuklide auszugehen (gilt nur für Abgaben bis max. 10^{15} Bq · a^{-1}), falls keine spezifischen Abgabewerte vorliegen.

a) Edelgase

	Siedewasserreaktor	Druckwasserreaktor
Kr-85m	2 %	2 %
Kr-85	2 %	2 %
Kr-87	1 %	1 %
Kr-88	3 %	3 %
Kr-89	3 %	0 %
Xe-131m	2 %	1 %
Xe-133	70 %	80 %
Xe-135m	2 %	0 %
Xe-135	2 %	10 %
Xe-137	8 %	0 %
Xe-138	5 %	1 %

b) Schwebstoffe

	Leichtwassergekühlte Reaktoren
Co-58	10 %
Co-60	40 %
Cs-134	15 %
Cs-137	34 %
Sr-90	1 %

Die Angaben beziehen sich auf die Gesamtschwebstoffaktivität mit Ausnahme von Jod.

Bei der Schwebstoffaktivität ist von einer Berücksichtigung der kurzlebigen Radionuklide mit einer Halbwertszeit < 8 Tage abzusehen.

Anhang 12
Radionuklidgemische für Ableitungen mit Wasser

Für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren ist, falls keine spezifischen Daten vorliegen, das folgende Modellgemisch für die Rechnung anzusetzen (Angaben bezogen auf die Gesamtaktivität, mit Ausnahme von Tritium):

Co-58	19 %
Co-60	20 %
Sr-90	1 %
I-131	10 %
Cs-134	20 %
Cs-137	30 %

Ist die Grabenbewässerung oder der Sedimentauftrag auf landwirtschaftliche Nutzflächen zu berücksichtigen, so muss die Konservativität des Gemisches überprüft werden.

Anhang 13
Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch

Sofern die jeweilige Elementkonzentration im Wasser bekannt ist, ist es zulässig, abweichend von dem Festwert in Spalte 2, den Konzentrationsfaktor für Fischfleisch nach der Gleichung in Spalte 3 zu berechnen.

Element	Konzentrationsfaktoren T_r^{Fi} in l · kg^{-1}	
	Festwert	Gleichung [28])
H	1	
C	8000 [29])	
Na	100	
P	2000	200000 / $(P)_W$
Cr	200	
Mn	100	137 / $(Mn)_W^{0,9}$
Fe	100	14500 / $(Fe)_W^{1,22}$
Co	100	3,29 / $(Co)_W^{0,74}$
Ni	100	
Cu	10	
Zn	400	5160 / $(Zn)_W$
Se	200	
Rb	2000	
Sr	30	
Zr	200	
Nb	200	
Tc	80	
Ru	100	
Ag	10	1,25 / $(Ag)_W^{0,85}$

[28]) $(P)_W$, $(Mn)_W$, $(Co)_W$, $(Fe)_W$, $(Zn)_W$, $(Ag)_W$ und $(K)_W$ ist die jeweilige Elementkonzentration im Wasser in µg · l^{-1}

[29]) berechnet aus $\mathbf{T_{C-14}^{Fi}} = \frac{f_C^{Fi}}{f_C^W}$ mit $\mathbf{f_C^{Fi}} = \mathbf{0,2}$ (Massenanteil des Kohlenstoffes in Fischfleisch) und $f_C^W = 25 \cdot 10^{-6} \cdot l^{-1}$ (Konzentration von anorganischem Kohlenstoff im Wasser)

Element	Konzentrationsfaktoren T_r^{Fi} in l · kg^{-1}	
	Festwert	Gleichung [28])
Cd	200	
Sn	3000	
Sb	100	
I	50	
Cs	1500	$1{,}5 \cdot 10^7$ / $(K)_W$
Ba	200	
La	100	
Ce	150	
Pm	25	
Au	30	
Hg	1000	
Tl	10000	
Pb	60	
Bi	15	
Po	300	
Ra	10	
Th	30	
U	2	
Np	10	
Pu	8	
Am	25	
Cm	25	

Anhang 14
Halbwertszeiten für die Anlagerung an Schwebstoffen; Übergangskonstanten

Tabelle 1

Elementgruppen und Halbwertszeiten $T_{Anl,r}$ für die Anlagerung an Schwebstoffe

Elementgruppe	K_F^r (l · kg^{-1})	$T_{Anl,r}$ (d)	Elemente
1	100	0	Sr, Tc, Te, Sb, Ra, Nb, Ag
2	10000	1,5	Cs, Zn, Y, La, I
3	30000	2,5	Co, Ce, Ru, Mn, Cr, Fe, Zr, Ni, Aktiniden

Elemente, die nicht aufgeführt sind, sind gemäß ihrer chemischen Verwandtschaft zu angegebenen Elementen in die entsprechende Gruppe einzuordnen. Falls dies nicht möglich ist, sind sie der Gruppe mit der größten Halbwertszeit für die Anlagerung an Schwebstoffe zuzuordnen.

Tabelle 2

Übergangskonstante K_e^r in Abhängigkeit von Elementgruppe und Entfernungsbereich zum Emittenten

	K_e^r in 10^{-5} l · m^{-2} · s^{-1}	
Elementgruppe	Nahbereich	Fernbereich
1	2	2
2	30	200
3	60	500

Elemente sind entsprechend Tabelle 1 in die verschiedenen Elementgruppen einzuordnen.

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 Strahlenexposition während der Betriebsphase relevant sind, werden sie i. A. in den entsprechenden Dosiskoeffizienten, 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
  - von Milch
  - von Muttermilch

Wasserpfad:

- Gamma-Bodenstrahlung auf Ufersedimenten, Überschwemmungsgebieten und Spülfeldern
- Ingestion von Blattgemüse und anderen pflanzlichen Produkten, Fleisch und Milch, die von Gebieten stammen, die beregnet wurden
- Ingestion von Blattgemüse und anderen pflanzlichen Produkten, Fleisch und Milch, die auf Überschwemmungsgebieten erzeugt wurden
- Ingestion von Muttermilch

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

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

Hier bedeuten:

$B_k(t)$: Flächenbezogene Aktivität des k-ten Radionuklids in der Zerfallskette in Bq · 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 · m^{-2} · s^{-1}
($= \dot{Q}_{B,k}$ für Fallout und Washout; $= \dot{Q}_{W,k}$ für Beregnung; $= \dot{Q}_{Ü,k}$ für Überschwemmungsgebiete)

λ_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
$k = 2, 3, 4$ … 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

$$\dot{Q}_{B,k} = A_k \cdot \left(\overline{F}_k^G + \overline{W}_k^G\right) \cdot a_p \qquad \text{für } k = 1$$

$$\dot{Q}_{B,k} = 0 \qquad \text{für } k \neq 1 \qquad (15.2)$$

durch Beregnung

$$\dot{Q}_{W,k} = \frac{W \cdot C_k^{Fließ} \cdot t_R}{365} \qquad \text{für } k = 1$$

$$\dot{Q}_{W,k} = 0 \qquad \text{für } k \neq 1 \qquad (15.3)$$

durch Überschwemmung

$$\dot{Q}_{Ü,k} = K_e^k \cdot C_k^{Fließ} \cdot \ln 2 \qquad \text{für } k = 1$$

$$\dot{Q}_{Ü,k} = 0 \qquad \text{für } k \neq 1 \qquad (15.4)$$

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

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

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

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

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 $B_k(t = 50\ a)$ 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)

$$\mathbf{H_{T,b,k} = B_k(t) \cdot g_{b,k,T} \cdot t_A \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \quad (15.8)$$

Neben den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$g_{b,k,T}$: Dosisleistungskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Bodenstrahlung des Radionuklids k ohne Tochternuklide in Sv · m² · Bq^{-1} · s^{-1}, siehe Anhang 2

t_A : Aufenthaltsdauer pro Jahr in s

$c_{Geo,b1}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, siehe Anhang 2

$c_{Geo,b2}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV, siehe Anhang 2

Wie bei der Berechnung der Jahresdosis durch äußere Bestrahlung beim Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten entfällt die explizite Korrektur für die Bodenrauigkeit 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 = Pf), in Blattgemüse (n = Bl) und in Weidepflanzen (n = Wd) berechnet sich nach der Gleichung:

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

Neben den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

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

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

Für Spülfelder ist die spezifische Aktivität von Mutter- und Tochternukliden zu betrachten. Die flächenbezogene Aktivität $B_k(t)$ 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 $\bar{C}_k^{Se}(t)$ berechnet sich wie folgt:

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

mit

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

Die spezifische Aktivität wird nach der Gleichung (15.1) errechnet, in die statt der flächenbezogenen Aktivität die spezifische Aktivität und statt der flächenbezogenen Aktivitätsdepositionsrate die Quellstärke der spezifischen Aktivität einzusetzen ist.

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

$$\mathbf{H_{T,Sp,k} = \bar{C}_k^{Se} \cdot \rho_{Sp} \cdot g_{b,k,T} \cdot t_A \cdot U_k \cdot \left(f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}\right)} \quad (15.11)$$

Bei zeitabhängigen Dosisberechnungen für die Nachbetriebsphase sind im Einzelfall gleichwertige vereinfachende Näherungslösungen 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.