

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV

Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 186. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 11. September 2003

Anmerkung der Geschäftsstelle zu Kapitel 4.3.2:

Die Berechnung des Transfers inkorporierter Radionuklide in die Muttermilch kann wissenschaftlich gleichwertig über die in dieser Empfehlung verwendeten transferierten Bruchteile der von der Mutter aufgenommenen Radionuklide in die Muttermilch oder über Transferfaktoren für den Übergang der Radionuklide aus der Nahrung der Mutter in die Muttermilch auf der Grundlage der Verzehrsmengen erfolgen. Die SSK wird im Jahr 2004 eine entsprechende Empfehlung basierend auf Transferfaktoren erarbeiten. Die im Ansatz unterschiedlichen Verfahren führen zu gleichen Ergebnissen.

Inhaltsverzeichnis

4	Berechnung der Strahlenexposition.....	5
4.1	Expositionspfade	5
4.2	Berechnung der äußeren Strahlenexposition	6
4.2.1	Strahlenexposition durch Betastrahlung innerhalb der Abluftfahne (Betasubmersion)	7
4.2.2	Strahlenexposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammasubmersion).....	7
4.2.3	Strahlenexposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (Bodenstrahlung).....	9
4.3	Berechnung der inneren Strahlenexposition.....	10
4.3.1	Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation).....	11
4.3.2	Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch (Ingestion)	11
4.4	Ausbreitung radioaktiver Stoffe und Umgebungskontamination.....	17
4.4.1	Störfallausbreitungsfaktoren χ_k für die bodennahe Aktivitätskonzentration	17
4.4.2	Störfall-Falloutfaktoren F_k für die trockene Ablagerung	19
4.4.3	Störfall-Washoutfaktoren W_k für die Ablagerung mit Niederschlägen	19
4.4.4	Störfallausbreitungsfaktoren $\chi_{\gamma n, k}$ für die Gammasubmersion	20
4.4.5	Probabilistisches Auswerteverfahren	22
4.5	Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten	22
4.5.1	Dosisleistungskoeffizienten für Betasubmersion $g_{\beta, r, T}$ ($\text{Sv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).....	22
4.5.2	Dosisleistungskoeffizienten für Gammasubmersion $g_{\gamma, r, T}$ ($\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) und Bodenstrahlung $g_{b, r, T}$ ($\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammasubmersion und Bodenstrahlung	22
4.5.3	Inhalationsdosiskoeffizienten $g_{h, r, T}$ ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$) und Ingestionsdosis- koeffizienten $g_{g, r, T}$ ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$).....	23
Anhang 1	24
Tabelle 1:	Daten zur Berechnung des Radionuklidtransports über den Ingestionspfad und bei der Gammabodenstrahlung	24
Tabelle 2:	Verzehrsraten	25
Tabelle 3:	Atemraten.....	26
Tabelle 4:	Transferdaten zur Berechnung des Radionuklidtransportes in pflanzliche Produkte, in die Milch und in das Fleisch.....	27

Tabelle 4a: Transferierte Bruchteile zur Berechnung des Übergangs inkorporierter Radionuklide in die Muttermilch	29
Tabelle 5: Verweilkonstante der Radionuklide aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten.....	31
Anhang 2	32
Berechnung der Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe (Kapitel 4.4)	32
Anhang 3	33
Daten und Interpolationsverfahren zur Berechnung der Ausbreitungsparameter $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ Kapitel 4.4).....	33
Anhang 4	35
Daten zur Berechnung der trockenen und nassen Ablagerung (Kapitel 4.4.2 und 4.4.3)	35
Tabelle 1: Ablagerungsgeschwindigkeiten zur Berechnung der trockenen Ablagerung (Kapitel 4.4.2).....	35
Tabelle 2: Niederschlagsintensität I zur Berechnung des Washoutkoeffizienten (Kapitel 4.4.3).....	35
Tabelle 3: Washoutkoeffizient Λ_0 für die Niederschlagsintensität I_0 (Kapitel 4.4.3).....	35
Anhang 5	36
Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft (Kapitel 4.4.4).....	36
Anhang 6	37
Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion (Kapitel 4.4.4).....	37
Anhang 7	38
Korrekturvorschriften zur Berücksichtigung von Gebäudeeinflüssen, besonderen orographischen Verhältnissen und Kühlturmeinflüssen in der Ausbreitungsrechnung (Kapitel 4.4).....	38
Anhang 8	41
Berechnung der effektiven Emissionshöhe bei gleichzeitiger Emission von radioaktiven Stoffen und größeren Wärmemengen (Kapitel 4.4.1)	41
Anhang 9	43
Methode für die Durchführung probabilistischer Berechnungen (Kapitel 4.4.5).....	43
Anhang 10	44
Abbildungen zur Berechnung der Kurzeitenausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion mit dem vereinfachten Verfahren (Kapitel 4.4.4)	44

4 Berechnung der Strahlenexposition

Die Strahlenexposition ist für Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen zu ermitteln. Referenzpersonen zur Ermittlung der Körperdosen im Sinne von § 49 der Strahlenschutzverordnung sind Personen der Altersgruppen der Anlage VII, Teil B StrlSchV mit den in den Tabellen 2 und 3 in Anhang 1 beschriebenen Lebensgewohnheiten. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage, bei denen aufgrund der Verteilung der emittierten radioaktiven Stoffe in der Umwelt unter Berücksichtigung realer Nutzungsmöglichkeiten¹ durch Aufenthalt und Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchste Strahlenexposition der Referenzpersonen zu erwarten ist.

Für den jeweiligen Auslegungstörfall sind die effektive Dosis und die Organdosen der Referenzpersonen bis zum 70. Lebensjahr zu berechnen.

Die im folgenden angegebenen Berechnungsverfahren berücksichtigen, dass im allgemeinen die Emission radioaktiver Stoffe und die Ausbreitungsbedingungen beim Störfall zeitlich nicht konstant sind. Deshalb wird der Zeitraum, in dem radioaktive Stoffe emittiert werden, ausgehend von der ersten Emission, in Zeitintervalle k unterteilt (siehe Kapitel 4.2 bis 4.4). Zur Vereinfachung wird für die Berechnung der Dosis angenommen, dass die Emission in einem Zeitintervall jeweils am Anfang des Zeitintervalls erfolgt. Bei zeitlich ungleichmäßigen Emissionen, bei denen die höchsten Werte nicht im ersten Zeitintervall liegen, ist darauf zu achten, dass die Emissionen, die zu den höchsten Strahlenexpositionen führen, mit den ungünstigsten Ausbreitungsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.4) korreliert werden.

4.1 Expositionspfade

Für die Dosisberechnung aus Emissionen radioaktiver Stoffe mit Luft im jeweiligen Auslegungstörfall sind folgende Expositionspfade zu berücksichtigen:

Zur Ermittlung der äußeren Strahlenexposition:

- Exposition durch Betastrahlung innerhalb der Abluftfahne (Betasubmersion)
- Exposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammastrahlung)
- Exposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (Bodenstrahlung)

Zur Ermittlung der inneren Strahlenexposition:

- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)
- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung (Ingestion)

¹ Unter Einbeziehung auch möglicher künftiger Änderungen der Besiedlung oder künftigen Nutzung, soweit diese nicht prinzipiell aufgrund der ökologischen Verhältnisse außer Betracht bleiben können.

auf dem Weg

- Luft – Pflanze
- Luft – Futterpflanze – Kuh – Milch
- Luft – Futterpflanze – Tier – Fleisch
- Luft – Muttermilch
- Luft – Nahrung – Muttermilch

Expositionspfade bleiben unberücksichtigt oder zusätzliche Expositionspfade sind zu berücksichtigen, wenn dies aufgrund der örtlichen Besonderheiten des Standortes begründet ist.

Bei der Berechnung der Strahlenexposition ist wie folgt zu verfahren:

Unter Berücksichtigung realer Nutzungsmöglichkeiten sind die Stellen zugrunde zu legen, an denen sich die höchste effektive Dosis oder die höchsten Organdosen ergeben. Dabei sind für die Summe der Dosen aus der externen Strahlenexposition durch die Abluftfahne (Betasubmersion und Gammasubmersion) und Inhalation sowie für die Dosis durch Bodenstrahlung jeweils die Stellen auszuwählen, an denen die Dosen am höchsten sind. Zusätzlich sind die Ingestionsdosen zu berücksichtigen, die sich unter Zugrundelegung der Ernährungsgewohnheiten der Referenzpersonen gemäß Anhang 1, Tabelle 2 durch den Verzehr von Lebensmitteln ergeben. Dabei ist für die Erzeugung jeder Lebensmittelgruppe jeweils die Stelle auszuwählen, für die sich die höchsten Organdosen oder die höchste effektive Dosis durch den Verzehr dieser Lebensmittelgruppe ergeben.

Die effektive Dosis kann vereinfachend mit den einzelnen radionuklidspezifischen Effektivdosiskoeffizienten berechnet werden.

4.2 Berechnung der äußeren Strahlenexposition

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

Für alle Organe oder Gewebe T ist:

$$H_{T,a,r} = H_{T,\beta,r} + H_{T,\gamma,r} + H_{T,b,r} \quad (4.1)$$

Hierin bedeuten:

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

$H_{T,\beta,r}$: Dosis in der Hauttiefe 0,07 mm durch Betasubmersion durch das Radionuklid r in Sv

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

$H_{T,b,r}$: Dosis im Organ oder Gewebe T durch Gammastrahlung über kontaminiertem Boden während der Expositionszeit bis zum 70. Lebensjahr durch das Radionuklid r in Sv

Die Dosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition aus der Emission radioaktiver Stoffe mit Luft für den jeweiligen Auslegungsstörfall ergibt sich zu:

$$H_{T,a} = \sum_r H_{T,a,r} \quad (4.2)$$

Die Berechnung der drei Anteile an der Dosis im Organ oder Gewebe T durch äußere Strahlenexposition bei der Emission radioaktiver Stoffe mit Luft durch das Radionuklid r ist in der folgenden Weise durchzuführen:

4.2.1 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.

$$H_{T,\beta,r} = g_{\beta,r,T} \cdot \sum_{k=1}^N Q_{r,k} \cdot \chi_k \quad (4.3)$$

Dabei ist:

$H_{T,\beta,r}$: Dosis in der Hauttiefe 0,07 mm durch Betasubmersion durch das Radionuklid r in Sv

$Q_{r,k}$: freigesetzte Aktivität des Radionuklids r im Zeitintervall k in Bq

χ_k : Störfallausbreitungsfaktor im Zeitintervall k in $s \cdot m^{-3}$, s. Kapitel 4.4.1

N: Zahl der Zeitintervalle, in denen die Aktivitätsfreisetzung erfolgt

$g_{\beta,r,T}$: Dosisleistungskoeffizient für die Haut in 0,07 mm Hauttiefe durch Betasubmersion durch das Nuklid r in $Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, für alle anderen Organe ist $g_{\beta,r,T} = 0$, s. Kapitel 4.5.1

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.

4.2.2 Strahlenexposition durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gamma-submersion)

Bei der Berechnung der Dosis durch Gammastrahlung aus der Abluftfahne sind wegen der großen Reichweite der Gamma-Quanten die Beiträge aus der gesamten Abluftfahne zu berücksichtigen. Es ist über alle Volumenelemente der Abluftfahne unter Berücksichtigung der Absorption und Streuung der Gamma-Quanten durch Luft, Erdboden und im Menschen zu integrieren. Beim Zerfall der Radionuklide werden Gamma-Quanten verschiedener Energie emittiert. Der Dosisberechnung sind zwei Energiegruppen, unterhalb und oberhalb 0,2 MeV, zugrunde zu legen. Damit ergibt sich:

$$H_{T,\gamma,r} = g_{\gamma,r,T} \sum_{k=1}^N Q_{r,k} \cdot \left(f_r \cdot \chi_{\gamma 1,k} \cdot c_{Geo,\gamma 1} + (1 - f_r) \cdot \chi_{\gamma 2,k} \cdot c_{Geo,\gamma 2} \right) \quad (4.4)$$

Es ist zulässig, die Störfallausbreitungsfaktoren für die Gamma-Energien unter 0,2 MeV durch den Störfallausbreitungsfaktor für 0,1 MeV ($\chi_{\gamma 2,k}$) und für die höheren Gamma-Energien durch den Störfallausbreitungsfaktor für 1 MeV ($\chi_{\gamma 1,k}$) zu beschreiben.

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

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

$\chi_{\gamma 1,k}$: Störfallausbreitungsfaktor für Gammasubmersion in $s \cdot m^{-2}$ für das Zeitintervall k und die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, s. Kapitel 4.4.4

$\chi_{\gamma 2,k}$: Störfallausbreitungsfaktor für Gammasubmersion in $s \cdot m^{-2}$ für das Zeitintervall k und 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 $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, s. Kapitel 4.5.2

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

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

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 Referenzpersonen bei Gammasubmersion für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, s. Kapitel 4.5.2

$c_{Geo,\gamma 2}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammasubmersion für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV, s. Kapitel 4.5.2

Folgende Vereinfachung für die Ausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion ist zulässig:

$$\chi_{\gamma 2,k} = 2 \chi_{\gamma 1,k}$$

Damit vereinfacht sich die Gleichung zur Berechnung der Dosis zu:

$$H_{T,\gamma,r} = g_{\gamma,r,T} \sum_{k=1}^N Q_{r,k} \cdot \chi_{\gamma 1,k} \cdot (f_r \cdot c_{Geo,\gamma 1} + 2 \cdot (1 - f_r) \cdot c_{Geo,\gamma 2}) \quad (4.5)$$

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.

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

Die Dosis ergibt sich aus den Beiträgen der Strahlenexposition infolge der durch Fallout und Washout abgelagerten radioaktiven Stoffe. Die Dosis errechnet sich nach folgenden Formeln:

Altersgruppe ≤ 1 Jahr:

$$H_{T,b,r} = \left[(1-x) \cdot (g_{b,r,T}^{0-1a} + b \cdot g_{b,r,T}^{1-2a} \cdot x) + (1-x^5) \cdot b \cdot (g_{b,r,T}^{2-7a} \cdot x^2 + g_{b,r,T}^{7-12a} \cdot x^7 + g_{b,r,T}^{12-17a} \cdot x^{12}) + (1-x^{53}) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{>17a} \cdot x^{17} \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot \sum_{k=1}^N (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \quad (4.6a)$$

Altersgruppe $> 1 - \leq 2$ Jahre:

$$H_{T,b,r} = \left[(1-x) \cdot g_{b,r,T}^{1-2a} + (1-x^5) \cdot b \cdot (g_{b,r,T}^{2-7a} \cdot x + g_{b,r,T}^{7-12a} \cdot x^6 + g_{b,r,T}^{12-17a} \cdot x^{11}) + (1-x^{53}) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{>17a} \cdot x^{16} \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot \sum_{k=1}^N (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \quad (4.6b)$$

Altersgruppe $> 2 - \leq 7$ Jahre:

$$H_{T,b,r} = \left[(1-x) \cdot g_{b,r,T}^{2-7a} + (1-x^4) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{2-7a} \cdot x + (1-x^5) \cdot b \cdot (g_{b,r,T}^{7-12a} \cdot x^5 + g_{b,r,T}^{12-17a} \cdot x^{10}) + (1-x^{53}) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{>17a} \cdot x^{15} \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot \sum_{k=1}^N (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \quad (4.6c)$$

Altersgruppe $> 7 - \leq 12$ Jahre:

$$H_{T,b,r} = \left[(1-x) \cdot g_{b,r,T}^{7-12a} + (1-x^4) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{7-12a} \cdot x + (1-x^5) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{12-17a} \cdot x + (1-x^{53}) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{>17a} \cdot x^{10} \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot \sum_{k=1}^N (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \quad (4.6d)$$

Altersgruppe $> 12 - \leq 17$ Jahre:

$$H_{T,b,r} = \left[(1-x) \cdot g_{b,r,T}^{12-17a} + (1-x^4) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{12-17a} \cdot x + (1-x^{53}) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{>17a} \cdot x^5 \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot \sum_{k=1}^N (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \quad (4.6e)$$

Altersgruppe > 17 Jahre:

$$H_{T,b,r} = \left[(1-x) \cdot g_{b,r,T}^{>17a} + (1-x^{52}) \cdot b \cdot g_{b,r,T}^{>17a} \cdot x \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot \sum_{k=1}^N (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \quad (4.6f)$$

mit

$$x = \exp(-\lambda_r \cdot t_1) \text{ und } x^m = \exp(-\lambda_r \cdot m \cdot t_1); m = 2 \dots 53$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- $H_{T,b,r}$: Dosis im Organ oder Gewebe T durch Gammastrahlung über kontaminiertem Boden für Referenzpersonen bis zum 70. Lebensjahr durch das Radionuklid r in Sv
- $F_{r,k}$: Störfall-Falloutfaktor im Zeitintervall k für das Nuklid r in m^{-2} , s. Kapitel 4.4.2
- $W_{r,k}$: Störfall-Washoutfaktor im Zeitintervall k für das Nuklid r in m^{-2} , s. Kapitel 4.4.3
- λ_r : physikalische Zerfallskonstante des Nuklids r in s^{-1}
- t_1 : Expositionszeit von 1 Jahr, s. Tabelle 1 im Anhang 1
- b : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Bodenrauhigkeit und des Eindringens in tiefere Bodenschichten, s. Tabelle 1 im Anhang 1
- $g_{b,r,T}^j$: Dosisleistungskoeffizient für Referenzpersonen der Altersgruppe j für das Organ oder Gewebe T durch Bodenstrahlung des Radionuklids r in $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, s. Kapitel 4.5.2
- $$g_{b,r,T}^j = g_{b,r,T} \cdot (f_r \cdot c_{Geo,b1}^j + (1-f_r) \cdot c_{Geo,b2}^j)$$
- $g_{b,r,T}$: Dosisleistungskoeffizient für Referenzpersonen der Altersgruppe > 17 a für das Organ oder Gewebe T durch Bodenstrahlung des Radionuklids r in $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, s. Kapitel 4.5.2
- $c_{Geo,b1}^j$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV, s. Kapitel 4.5.2
- $c_{Geo,b2}^j$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV, s. Kapitel 4.5.2

Bilden sich nach der Ablagerung radioaktiver Stoffe aus Emissionen im Auslegungsstörfall auf dem Boden Tochternuklide, so ist bei der Berechnung der Dosis der Dosisleistungskoeffizient des primären Radionuklids mit Berücksichtigung der Tochternuklide anzuwenden.

4.3 Berechnung der inneren Strahlenexposition

Die Dosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition aus der Emission radioaktiver Stoffe mit Luft im Auslegungsstörfall durch das Radionuklid r ergibt sich aus der Summe der Beiträge durch Inhalation und Ingestion.

Es ist:

$$H_{T,i,r} = H_{T,h,r} + H_{T,g,r} \quad (4.8)$$

Hierin bedeuten:

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

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

$H_{T,g,r}$: Dosis im Organ oder Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r in Sv über einen Aufnahmezeitraum der Referenzpersonen bis zum 70. Lebensjahr

Die Dosis im Organ oder Gewebe T durch innere Strahlenexposition aus der Emission radioaktiver Stoffe mit Luft im Auslegungsstörfall ergibt sich zu:

$$H_{T,i} = \sum_r H_{T,i,r} \quad (4.9)$$

Die Berechnung der beiden Anteile an der Dosis im Organ oder Gewebe T durch das Radionuklid r ist in der folgenden Weise durchzuführen:

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

Die Strahlenexposition durch Inhalation des Radionuklids r ist von der Aktivitätskonzentration der Luft am betrachteten Ort abhängig. Die Dosis beträgt für das Organ oder Gewebe T:

$$H_{T,h,r} = g_{h,r,T} \cdot \sum_{k=1}^N Q_{r,k} \cdot \chi_k \cdot \dot{V}_k \quad (4.10)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

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

\dot{V}_k : Atemrate in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ im Zeitintervall k, s. Tabelle 3 im Anhang 1

$g_{h,r,T}$: Dosiskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Inhalation des Radionuklids r in $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$, s. Kapitel 4.5.3

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

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

Die Strahlenexposition durch Ingestion ergibt sich durch die mit der Nahrung und Muttermilch aufgenommenen radioaktiven Stoffe. Es sind die vier Nahrungsmittelgruppen Blattgemüse, sonstige pflanzliche Produkte, Milch und Fleisch zu betrachten. Für Referenzpersonen der Altersgruppe ≤ 1 Jahr ist zusätzlich der Verzehr von Muttermilch zu berücksichtigen.

Die Kontamination der pflanzlichen Nahrungsmittel bzw. des Weidegrases erfolgt durch Ablagerung von radioaktiven Stoffen auf der Vegetation und durch Aufnahme von radioak-

tiven Stoffen aus kontaminiertem Boden über die Wurzeln. Die Zufuhr der Aktivität zum Menschen erfolgt direkt (Blattgemüse, sonstige pflanzliche Produkte) sowie indirekt (Milch, Fleisch, Muttermilch).

Die Ingestionsdosis ergibt sich nach folgenden Formeln:

Altersgruppe > 1 - ≤ 2 Jahre:

$$\begin{aligned}
 H_{T,g,r} = & g_{g,r,T}^{1-2a} \sum_{k=1}^L [J_{1-2a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{1-2a} \sum_{k=1}^N [J_{1-2a}^{g2}(0; 0; t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{2-7a} \sum_{k=1}^N [J_{2-7a}^{g2}(0; t_1; 6 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{7-12a} \sum_{k=1}^N [J_{7-12a}^{g2}(0; 6 \cdot t_1; 11 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{12-17a} \sum_{k=1}^N [J_{12-17a}^{g2}(0; 11 \cdot t_1; 16 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^N [J_{>17a}^{g2}(0; 16 \cdot t_1; 69 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}]
 \end{aligned} \tag{4.11a}$$

Altersgruppe > 2 - ≤ 7 Jahre:

$$\begin{aligned}
 H_{T,g,r} = & g_{g,r,T}^{2-7a} \sum_{k=1}^L [J_{2-7a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{2-7a} \sum_{k=1}^N [J_{2-7a}^{g2}(0; 0; 5 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{7-12a} \sum_{k=1}^N [J_{7-12a}^{g2}(0; 5 \cdot t_1; 10 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{12-17a} \sum_{k=1}^N [J_{12-17a}^{g2}(0; 10 \cdot t_1; 15 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^N [J_{>17a}^{g2}(0; 15 \cdot t_1; 68 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}]
 \end{aligned} \tag{4.11b}$$

Altersgruppe > 7 - ≤ 12 Jahre:

$$\begin{aligned}
 H_{T,g,r} = & g_{g,r,T}^{7-12a} \sum_{k=1}^L [J_{7-12a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{7-12a} \sum_{k=1}^N [J_{7-12a}^{g2}(0; 0; 5 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{12-17a} \sum_{k=1}^N [J_{12-17a}^{g2}(0; 5 \cdot t_1; 10 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^N [J_{>17a}^{g2}(0; 10 \cdot t_1; 63 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}]
 \end{aligned} \tag{4.11c}$$

Altersgruppe > 12 - ≤ 17 Jahre:

$$\begin{aligned}
 H_{T,g,r} = & g_{g,r,T}^{12-17a} \sum_{k=1}^L \left[J_{12-17a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right] + \\
 & g_{g,r,T}^{12-17a} \sum_{k=1}^N \left[J_{12-17a}^{g2}(0; 0; 5 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right] + \\
 & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^N \left[J_{>17a}^{g2}(0; 5 \cdot t_1; 58 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right]
 \end{aligned} \quad (4.11d)$$

Altersgruppe > 17 Jahre:

$$\begin{aligned}
 H_{T,g,r} = & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^L \left[J_{>17a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right] + \\
 & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^N \left[J_{>17a}^{g2}(0; 0; 53 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right]
 \end{aligned} \quad (4.11e)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$H_{T,g,r}$: Dosis durch Ingestion des Radionuklids r im Organ oder Gewebe T in Sv über einen Aufnahmezeitraum der Referenzpersonen bis zum 70. Lebensjahr

$g_{g,r,T}^j$: Dosiskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r in Sv · Bq⁻¹ für Referenzpersonen der Altersgruppe j, s. Kapitel 4.5.3

$J_j^{g1}(t_k; t_A; t_B)$: Faktor, der für Referenzpersonen der Altersgruppe j die Aktivitätszufuhr durch die vier Nahrungsmittelgruppen im Zeitraum zwischen t_A und t_B infolge der Direktdeposition auf oberirdische Pflanzenteile nach einer Kurzzeit-Emission zum Zeitpunkt t_k beschreibt, in m²

$J_j^{g2}(t_k; t_A; t_B)$: Faktor, der für Referenzpersonen der Altersgruppe j die Aktivitätszufuhr durch die vier Nahrungsmittelgruppen im Zeitraum zwischen t_A und t_B infolge der Wurzelaufnahme von Aktivität nach einer Kurzzeit-Emission zum Zeitpunkt t_k beschreibt, in m²

f_w: Anteil der auf der Pflanze abgelagerten Aktivität (für Washout), s. Tabelle 1 im Anhang 1

L: - im Umkreis von 2 000 m Radius: Zahl der Zeitintervalle bis 24 Stunden, in denen die Emission erfolgt

- außerhalb des Umkreises von 2 000 m Radius: L = N

t'_k: - für die im Umkreis von 2 000 m Radius kontaminierten Nahrungs- und Futtermittel: Zeit zwischen Beginn der Emission im Zeitintervall k und Einstellung des Verzehrs von kontaminierten Nahrungsmitteln und Futter in Sekunden

- für die außerhalb des Umkreises von 2 000 m Radius kontaminierten Nahrungs- und Futtermittel: Zeit zwischen Beginn der Emission im Zeitintervall k und dem Ende des Wachstums in Sekunden

$$t'_k = t' - t_k = t' - \sum_{i=1}^{k-1} \Delta t_i$$

- t' : - für die im Umkreis von 2 000 m Radius kontaminierten Nahrungs- und Futtermittel: Ingestionsdauer bzw. Zeit bis zur Einstellung des Verzehrs kontaminierter Nahrungsmittel und kontaminierter Futters nach Beginn der Emission in Sekunden, s. Tabelle 1 im Anhang 1
 - für die außerhalb des Umkreises von 2 000 m Radius kontaminierten Nahrungs- und Futtermittel: Wachstumszeit t_e in Sekunden, s. Tabelle 1 im Anhang 1
- t_k : Zeit zwischen Beginn der Emission und Beginn des Zeitintervalls k in Sekunden

$$t_k = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta t_i$$

Der Faktor $J_j^{g1}(t_k; t_A; t_B)$, der für Referenzpersonen der Altersgruppe j die Aktivitätszufuhr durch die vier Nahrungsmittelgruppen im Zeitraum zwischen t_A und t_B infolge der Direktdeposition auf oberirdische Pflanzenteile nach einer Kurzzeit-Emission zum Zeitpunkt t_k beschreibt, ist nach folgender Formel zu berechnen:

$$J_j^{g1}(t_k; t_A; t_B) = \frac{1}{a_{sa} \cdot \lambda_{eff,r}^{Pf}} \cdot \exp(-\lambda_{eff,r}^{Pf} \cdot (t_A - t_k)) \cdot [1 - \exp(-\lambda_{eff,r}^{Pf} \cdot (t_B - t_A))] \cdot \left\{ \left(\frac{U_j^{Bl}}{Y^{Bl}} + \frac{U_j^{Pf}}{Y^{Pf}} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Pf}) \right) + \frac{\dot{M}_{Fu}}{Y^{Wd}} \cdot (U_j^{Mi} \cdot T_r^{Mi} + U_j^{Fl} \cdot T_r^{Fl} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Fl})) \right\} \quad (4.13)$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Aufnahme der im Umkreis von 2 000 m Radius über oberirdische Pflanzenteile kontaminierten Nahrungsmittel und des in diesem Umkreis über oberirdische Pflanzenteile kontaminierten Futters einen Tag nach der ersten Emission eingestellt wird. Mit der Zeit t'_k vom Anfang des Zeitintervalls k bis zum Zeitpunkt der Einstellung der Aufnahme kontaminierter Nahrungsmittel und bis zum Zeitpunkt der Einstellung der Aufnahme kontaminierter Futters bzw. bis zum Wachstumsende ergibt sich der Faktor J_j^{g1} zu:

$$J_j^{g1}(t_k; t_A = t_k; t_B = t_k + t'_k) = \frac{1}{a_{sa} \cdot \lambda_{eff,r}^{Pf}} \cdot (1 - \exp(-\lambda_{eff,r}^{Pf} \cdot t'_k)) \cdot \left\{ \left(\frac{U_j^{Bl}}{Y^{Bl}} + \frac{U_j^{Pf}}{Y^{Pf}} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Pf}) \right) + \frac{\dot{M}_{Fu}}{Y^{Wd}} \cdot (U_j^{Mi} \cdot T_r^{Mi} + U_j^{Fl} \cdot T_r^{Fl} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Fl})) \right\} \quad (4.13a)$$

Bei der Beschreibung des Transfers der Radionuklide vom kontaminierten Boden zur Vegetation wird zur Vereinfachung – und weil der Einfluss einer Bodennutzungsunterbrechung bis zum Beginn der nächsten Vegetationsperiode in der Regel vernachlässigbar ist – von einer ununterbrochenen Bodennutzung bis zum 70. Lebensjahr der Referenzpersonen ausgegangen. Der Faktor $J_j^{g2}(t_k; t_A; t_B)$ beschreibt für Referenzpersonen der Altersgruppe j die Aktivitätszufuhr durch die vier Nahrungsmittelgruppen im Zeitraum zwischen t_A und t_B infolge der Wurzel Aufnahme von Aktivität nach einer Kurzzeit-Emission zum Zeitpunkt t_k . Der Faktor ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
J_j^{g2}(t_k; t_A; t_B) = & \frac{1}{a_{sa} \cdot \lambda_{eff,A,r}^{Bo}} \cdot \exp(-\lambda_{eff,A,r}^{Bo} \cdot (t_A - t_k)) \cdot [1 - \exp(-\lambda_{eff,A,r}^{Bo} \cdot (t_B - t_A))] \cdot \\
& \frac{T_r^{Pf}}{p^A} \cdot (U_j^{Bl} + U_j^{Pf} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Pf})) + \\
& \frac{1}{a_{sa} \cdot \lambda_{eff,Wd,r}^{Bo}} \cdot \exp(-\lambda_{eff,Wd,r}^{Bo} \cdot (t_A - t_k)) \cdot [1 - \exp(-\lambda_{eff,Wd,r}^{Bo} \cdot (t_B - t_A))] \cdot \\
& \frac{\dot{M}_{Fu} \cdot T_r^{Wd}}{p^{Wd}} \cdot (U_j^{Mi} \cdot T_r^{Mi} + U_j^{Fl} \cdot T_r^{Fl} \cdot \exp(-\lambda_r \cdot t_v^{Fl}))
\end{aligned} \quad (4.14)$$

In den Formeln für J_j^{g1} und J_j^{g2} bedeuten:

a_{sa} : Umrechnungsfaktor (Anzahl der Sekunden pro Jahr), s. Tabelle 1 im Anhang 1

U_j^{Bl} : Verzehrrate für Blattgemüse für Referenzpersonen der Altersgruppe j in $kg \cdot a^{-1}$, s. Tabelle 2 im Anhang 1

U_j^{Pf} : Verzehrrate für sonstige pflanzliche Produkte für Referenzpersonen der Altersgruppe j in $kg \cdot a^{-1}$, s. Tabelle 2 im Anhang 1

U_j^{Mi} : Verzehrrate für Milch für Referenzpersonen der Altersgruppe j in $kg \cdot a^{-1}$, s. Tabelle 2 im Anhang 1

U_j^{Fl} : Verzehrrate für Fleisch für Referenzpersonen der Altersgruppe j in $kg \cdot a^{-1}$, s. Tabelle 2 im Anhang 1

λ_r : physikalische Zerfallskonstante des Nuklids r in s^{-1}

$\lambda_{eff,r}^{Pf}$: effektive Abklingkonstante des Nuklids r auf der Vegetation in s^{-1}
 $\lambda_{eff,r}^{Pf} = \lambda_r + 5,7 \cdot 10^{-7}$

$\lambda_{eff,M,r}^{Bo}$: effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r im Wurzelbereich der Pflanze in s^{-1}
 $\lambda_{eff,M,r}^{Bo} = \lambda_r + \lambda_{M,r}$

mit

$M = A$ für Blattgemüse und sonstige pflanzliche Produkte

$M = Wd$ für Weidevegetation

$\lambda_{M,r}$: Verweilkonstante des Radionuklids r aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten außerhalb des Wurzelbereichs in s^{-1} , s. Tabelle 5 im Anhang 1

t_v^{Pf} : Zeit zwischen Ernte und Verzehr von sonstigen pflanzlichen Produkten, s. Tabelle 1 im Anhang 1

t_v^{Fl} : Zeit zwischen Schlachten und Fleischverzehr, s. Tabelle 1 im Anhang 1

t_1 : Zeitdauer eines Jahres in s , s. Tabelle 1 im Anhang 1

Y^{Bl}, Y^{Pf} : Ertrag (Frischmasse) von Blattgemüse bzw. sonstigen pflanzlichen Produkten in $kg \cdot m^{-2}$, s. Tabelle 1 im Anhang 1

Y^{Wd} : Ertrag (Frischmasse) von Weidegras in $kg \cdot m^{-2}$, s. Tabelle 1 im Anhang 1

p^A : Flächentrockenmasse des Bodens in $kg \cdot m^{-2}$ für pflanzliche Produkte und Blattgemüse, s. Tabelle 1 im Anhang 1

- p^{Wd} : Flächentrockenmasse des Bodens in $kg \cdot m^{-2}$ für Weidevegetation und Weidelandboden, s. Tabelle 1 im Anhang 1
- T_r^{Pf}, T_r^{Wd} : Transferfaktor Boden-Pflanze bzw. Boden-Weidepflanze in kg Trockensubstanz Boden pro kg Feuchtsubstanz Pflanze, s. Tabelle 4 im Anhang 1
- T_r^{Mi} : Transferfaktor Pflanze-Milch in $d \cdot kg^{-1}$, s. Tabelle 4 im Anhang 1
- T_r^{Fl} : Transferfaktor Pflanze-Fleisch in $d \cdot kg^{-1}$, s. Tabelle 4 im Anhang 1
- \dot{M}_{Fu} : Futterkonsumrate der Weidetiere in kg Frischmasse pro d , s. Tabelle 1 im Anhang 1

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

$$\begin{aligned}
 H_{T,g,r} = & g_{g,r,T}^{0-1a} \sum_{k=1}^L [J_{0-1a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{0-1a} \sum_{k=1}^N [J_{0-1a}^{g2}(0; 0; t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{1-2a} \sum_{k=1}^N [J_{1-2a}^{g2}(0; t_1; 2 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{2-7a} \sum_{k=1}^N [J_{2-7a}^{g2}(0; 2 \cdot t_1; 7 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{7-12a} \sum_{k=1}^N [J_{7-12a}^{g2}(0; 7 \cdot t_1; 12 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{12-17a} \sum_{k=1}^N [J_{12-17a}^{g2}(0; 12 \cdot t_1; 17 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{>17a} \sum_{k=1}^N [J_{>17a}^{g2}(0; 17 \cdot t_1; 70 \cdot t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k}] + \\
 & g_{g,r,T}^{0-1a} \cdot (A_r^{g;1a} \cdot f_r^{MM,g} + A_r^{h;1a} \cdot f_r^{MM,h})
 \end{aligned} \tag{4.14a}$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- $A_r^{g;1a}$: Menge des Radionuklids r in Bq, die im ersten Jahr nach Beginn der Emissionen von der Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommen wird, s. Gleichung (4.14b)
- $A_r^{h;1a}$: Menge des Radionuklids r in Bq, die im ersten Jahr nach Beginn der Emissionen von der Mutter durch Inhalation aufgenommen wird, s. Gleichung (4.14c)
- $f_r^{MM,g}$: Bruchteil der mit Lebensmitteln aufgenommenen Aktivität des Radionuklids r, der in die Muttermilch übergeht, s. Tabelle 4a im Anhang 1
- $f_r^{MM,h}$: Bruchteil der mit der Atemluft aufgenommenen Aktivität des Radionuklids r, der in die Muttermilch übergeht, s. Tabelle 4a im Anhang 1

Die von der stillenden Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln im ersten Jahr nach Beginn der Emissionen aufgenommene Aktivität $A_r^{g;1a}$ des Radionuklids r ist nach Formel (4.14b) zu berechnen:

$$A_r^{g:1a} = \sum_{k=1}^L \left[J_{>17a}^{g1}(t_k; t_k; t_k + t'_k) \cdot (F_{r,k} + f_w \cdot W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right] + \sum_{k=1}^N \left[J_{>17a}^{g2}(0; 0; t_1) \cdot (F_{r,k} + W_{r,k}) \cdot Q_{r,k} \right] \quad (4.14b)$$

Die von der stillenden Mutter durch Inhalation im ersten Jahr nach Beginn der Emissionen aufgenommene Aktivität $A_r^{h:1a}$ des Radionuklids r ist nach Formel (4.14c) zu berechnen:

$$A_r^{h:1a} = \sum_{k=1}^N Q_{r,k} \cdot \chi_k \cdot \dot{V}_k^{>17a} \quad (4.14c)$$

4.4 Ausbreitung radioaktiver Stoffe und Umgebungskontamination

Bei der Berechnung der Aktivitätskonzentration der bei einem Störfall emittierten radioaktiven Stoffe in der Luft wird die Abluftfahne durch eine zweidimensionale Gauß-Verteilung beschrieben. Dabei wird die Abluftfahne am Boden vollständig reflektiert.

Bei Störfällen ist im allgemeinen die Emission kurz, und in diesen Fällen ist mit Kurzzausbreitungsfaktoren zu rechnen. Bei länger andauernden Emissionszeiten führen Veränderungen der meteorologischen Bedingungen wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Diffusionskategorie dazu, dass für längere Zeitphasen verminderte Kurzzausbreitungsfaktoren eingesetzt werden können. Die Emission und Ausbreitung radioaktiver Stoffe werden daher in aufeinanderfolgenden Zeitintervallen k betrachtet, in denen die Emissions- und Ausbreitungsbedingungen als konstant angenommen werden.

Für die einzelnen Zeitabschnitte k nach Beginn der Emission sind die in den folgenden Kapiteln (4.4.1 bis 4.4.4) angegebenen Störfallausbreitungsfaktoren, Störfall-Falloutfaktoren und Störfall-Washoutfaktoren einzusetzen. Bei der Berechnung der Strahlenexposition ist die für das Gesamtergebnis ungünstigste Diffusionskategorie an den ungünstigsten Aufpunkten anzunehmen.

4.4.1 Störfallausbreitungsfaktoren χ_k für die bodennahe Aktivitätskonzentration

Die Störfallausbreitungsfaktoren sind bestimmt zur Dosisberechnung für die Expositionspfade Betasubmersion, Bodenstrahlung, Inhalation sowie für die Ingestion, s. Kapitel 4.2.1, 4.2.3, 4.3.1 und 4.3.2.

Zeitintervall k	Störfallausbreitungsfaktor χ_k	
bis 8 Stunden	$\hat{\chi}_{j,\max}$	$j = A \dots F$
8 bis 24 Stunden	$1/2 \hat{\chi}_{j,\max}$	$j = C \dots F$
24 bis 72 Stunden	$1/4 \hat{\chi}_{j,\max}$	$j = C \dots F$
3 bis 7 Tage	$1/8 \hat{\chi}_{j,\max}$	$j = C \dots E$

Dabei ist:

$\hat{\chi}_{j,\max}$: Kurzzeitausbreitungsfaktor $\hat{\chi}_j$ in Bodennähe (Ausbreitungsrichtung $y = 0$) für die Diffusionskategorie aus der Menge $j = A$ bis F für das Zeitintervall k , der zu der höchsten Gesamtdosis unter Berücksichtigung aller Expositionspfade führt,

und

$$\hat{\chi}_j = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{H_e^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right) \quad (4.17)$$

Bei kurzzeitigen Emissionen < 1 Stunde sind die Kurzzeitausbreitungsfaktoren für die Diffusionskategorien A und F mit einem Faktor 2 zu multiplizieren.

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

H_e : effektive Emissionshöhe in m

u : Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe in $m \cdot s^{-1}$, s. Anhang 2

$\sigma_{y,j}(x)$, $\sigma_{z,j}(x)$: Ausbreitungsparameter in m für die Diffusionskategorie j , s. Anhang 3

x , y : Koordinaten des Aufpunkts

Die Daten zur Berechnung der Ausbreitungsparameter und das Interpolationsverfahren zur Bestimmung der Abhängigkeit von der effektiven Emissionshöhe sind im Anhang 3 angegeben.

Die Windgeschwindigkeit u in effektiver Emissionshöhe ist aus der Windgeschwindigkeit u_1 in Bezugshöhe z_1 nach dem in Anhang 2 beschriebenen Verfahren zu ermitteln.

Wenn bei einem Auslegungsstörfall gleichzeitig mit der Emission radioaktiver Stoffe auch größere Wärmemengen emittiert werden, ist zur Berechnung der effektiven Emissionshöhe das im Anhang 8 beschriebene Verfahren anzuwenden. Dabei ist die für das Ergebnis ungünstigste Windgeschwindigkeit anzuwenden. Diese kann von der nach dem im Anhang 2 angegebenen Verfahren ermittelten Windgeschwindigkeit nach oben abweichen.

Trockene Ablagerung, Washout und radioaktiver Zerfall vermindern die Menge der Aktivität der radioaktiven Stoffe in der Wolke. Diese Effekte können durch folgende auf die Quellstärke anzuwendenden Korrekturfaktoren berücksichtigt werden:

$$f_A = \exp\left(-\frac{v_g}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^x \frac{\exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_{z,j}^2(x')}\right)}{\sigma_{z,j}(x')} dx'\right) \quad (\text{trockene Ablagerung}) \quad (4.18)$$

$$f_R = \exp\left(-\frac{\Lambda \cdot x}{u}\right) \quad (\text{Washout}) \quad (4.19)$$

$$f_{z,r} = \exp\left(-\frac{\lambda_r \cdot x}{u}\right) \quad (\text{radioaktiver Zerfall}) \quad (4.20)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

Λ : Washoutkoeffizient in s^{-1} , s. Kapitel 4.4.3

v_g : Ablagerungsgeschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$, s. Tabelle 1 im Anhang 4

Ist die Konzentrationsverteilung durch Gebäude gestört, d.h. erfolgt die Emission der radioaktiven Stoffe aus einer Höhe, die die doppelte Gebäudehöhe unterschreitet, so sind Korrekturen anzuwenden. Entsprechende Korrekturen sind auch bei besonderen orographischen Verhältnissen zu berücksichtigen. Dabei sind die Korrekturen in der folgenden Reihenfolge vorzunehmen:

1. thermische Überhöhung
2. Gebäudeeinfluss
3. Orographie

Kühlturmeinflüsse können z.B. aufgrund von Ergebnissen aus Windkanalversuchen berücksichtigt werden.

Die Korrekturvorschriften sind in den Anhängen 7 und 8 angegeben.

4.4.2 Störfall-Falloutfaktoren F_k für die trockene Ablagerung

Die Störfall-Falloutfaktoren F_k ergeben sich für jedes Zeitintervall k durch Multiplikation der Ablagerungsgeschwindigkeit v_g mit dem jeweiligen Störfallausbreitungsfaktor χ_k .

$$F_k = v_g \cdot \chi_k \quad (4.21)$$

Die Störfall-Falloutfaktoren F_k sind bestimmt zur Dosisberechnung für die Expositionspfade Bodenstrahlung und Ingestion (Kapitel 4.2.3 und 4.3.2, Falloutbeiträge).

Für die Ablagerungsgeschwindigkeit v_g sind die in Anhang 4, Tabelle 1, aufgeführten Werte anzuwenden.

4.4.3 Störfall-Washoutfaktoren W_k für die Ablagerung mit Niederschlägen

Die Störfall-Washoutfaktoren W_k werden durch Integration der mit dem Washoutkoeffizienten Λ multiplizierten Konzentrationsverteilung über die Höhe berechnet.

Sie sind bestimmt zur Dosisberechnung für die Expositionspfade Bodenstrahlung und Ingestion (Kapitel 4.2.3 und 4.3.2, Washoutbeiträge).

Für die verschiedenen Zeitintervalle k sind folgende Störfall-Washoutfaktoren anzuwenden:

Zeitintervall k	Störfall-Washoutfaktor W_k
bis 8 Stunden	$\hat{W}_{j,\max}$ j = C...E
8 bis 24 Stunden	$1/2 \hat{W}_{j,\max}$ j = D
24 bis 72 Stunden	$1/4 \hat{W}_{j,\max}$ j = D
3 bis 7 Tage	$1/8 \hat{W}_{j,\max}$ j = D

Dabei ist:

$\hat{W}_{j,\max}$: Kurzzeit-Washoutfaktor \hat{W}_j (Ausbreitungsrichtung $y=0$) für die Diffusionskategorie aus der Menge $j = C$ bis E für das Zeitintervall k , der zu der höchsten Gesamtdosis unter Berücksichtigung aller Expositionspfade führt,

wobei

$$\hat{W}_j = \frac{\Lambda}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right) \quad (4.22)$$

mit

$$\Lambda = \Lambda_0 \cdot \left(\frac{I}{I_0}\right)^\kappa \quad (4.23)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- Λ : Washoutkoeffizient in s^{-1}
- I : Niederschlagsintensität in $mm \cdot h^{-1}$, s. Tabelle 2 im Anhang 4
- Λ_0 : Washoutkoeffizient für die Niederschlagsintensität I_0 in s^{-1} , s. Tabelle 3 im Anhang 4
- I_0 : Niederschlagsmenge $1 mm \cdot h^{-1}$
- κ : Exponent (0,8 für Schwebstoffe und Iod)

4.4.4 Störfallausbreitungsfaktoren $\chi_{\gamma n,k}$ für die Gammasubmersion

Die Störfallausbreitungsfaktoren für die Gammasubmersion sind bestimmt zur Dosisberechnung für den Expositionspfad Gammastrahlung aus der Abluftfahne, s. Kapitel 4.2.2. Für die verschiedenen Zeitintervalle k und Energiegruppe 1 sind folgende Störfallausbreitungsfaktoren für die Gammasubmersion anzuwenden:

Zeitintervall k	Störfallausbreitungsfaktor für Gammasubmersion $\chi_{\gamma 1,k}$
bis 8 Stunden	$\hat{\chi}_{\gamma 1,j,\max}$ j = A...F
8 bis 24 Stunden	$1/2 \hat{\chi}_{\gamma 1,j,\max}$ j = C...F
24 bis 72 Stunden	$1/4 \hat{\chi}_{\gamma 1,j,\max}$ j = C...F
3 bis 7 Tage	$1/8 \hat{\chi}_{\gamma 1,j,\max}$ j = C...E

Dabei ist:

$\hat{\chi}_{\gamma 1, j, \max}$: Kurzzeitausbreitungsfaktor $\hat{\chi}_{\gamma 1, j}$ für die Gammastrahlung in Bodennähe (Ausbreitungsrichtung $y = 0$) für die Diffusionskategorie aus der Menge $j = A$ bis F für das Zeitintervall k und die Energiegruppe 1, der zu der höchsten Gesamtdosis unter Berücksichtigung aller Expositionspfade führt,

mit

$$\hat{\chi}_{\gamma 1, j} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int \int \Phi_1(\mu_1 z', \mu_1 s) \cdot \frac{\exp\left(-\frac{y'^2}{2\sigma_{y,j}^2(x')} - \frac{(z' - H)^2}{2\sigma_{z,j}^2(x')}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{y,j}(x') \cdot \sigma_{z,j}(x') \cdot u} dx' dy' dz' \quad (4.24)$$

und

$$\Phi_1(\mu_1 z', \mu_1 s) = \frac{\exp(-\mu_1 \cdot R)}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot B_1(\mu_1 R) \cdot K_1(\mu_1 z', \mu_1 s) \quad (4.25)$$

Bei kurzzeitigen Emissionen < 1 Stunde sind die Kurzzeitausbreitungsfaktoren für die Diffusionskategorien A und F mit einem Faktor 2 zu multiplizieren.

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- μ_1 : Gesamtschwächungskoeffizient für Gammastrahlen in Luft in m^{-1} (ohne kohärente Streuung) für die Energie $E_\gamma = 1$ MeV
- x, y, z : Koordinaten des Aufpunktes
- x', y', z' : Koordinaten des Quellpunktes (Volumenelement $dx' dy' dz'$)
- R : Abstand zwischen Volumenelement $dx' dy' dz'$ der Abluffahne am Ort (x', y', z') und dem Aufpunkt (x, y, z) in m
- $$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$
- s : horizontaler Abstand zwischen der senkrechten Projektion vom Volumenelement der Abluffahne auf den Boden und dem Aufpunkt
- $$s = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$
- $B_1(\mu_1 R)$: Dosisaufbaufaktor für die Gamma-Energie in Luft ohne Einfluss des Bodens, s. Anhang 5
- $K_1(\mu_1 z', \mu_1 s)$: Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens, s. Anhang 6

Es ist zulässig, die Kurzzeitausbreitungsfaktoren für Gammastrahlung $\hat{\chi}_{\gamma 1, j}$ bei der Diffusionskategorie j für eine vereinfachte Berechnung aus den Kurven in Anhang 10 zu entnehmen. Diese auf die Windgeschwindigkeit $u = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ normierten Werte sind mit der Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe für die entsprechende Diffusionskategorie zu korrigieren.

4.4.5 Probabilistisches Auswerteverfahren

Das unter 4.4.1 bis 4.4.4 angegebene Verfahren zur Durchführung der Ausbreitungsrechnung erfordert nicht die Ermittlung der für den Standort charakteristischen meteorologischen Daten. Liegen meteorologische Daten vor, die für eine Beurteilung der Ausbreitungssituation am Standort geeignet sind, so können diese zur Durchführung der Ausbreitungsrechnung herangezogen werden. Die meteorologischen Daten müssen 4-parametrig (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Diffusionskategorie, Niederschlagsrate) in höchstens 1-Stunden-Intervallen ermittelt sein. Vom Gutachter ist zu prüfen, ob die verwendeten Daten räumlich und zeitlich repräsentativ für den Standort sind. Die grundsätzliche Vorgehensweise für das Verfahren zur probabilistischen Auswertung ist im Anhang 9 beschrieben.

4.5 Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten

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

Es sind die Dosisleistungskoeffizienten aus der im Bundesanzeiger vom 23. Juli 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.

4.5.2 Dosisleistungskoeffizienten für Gammasubmersion $g_{\gamma,r,T}$ ($\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) und Bodenstrahlung $g_{b,r,T}$ ($\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) und 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 23. Juli 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 Altersgruppe ≤ 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 Dosisleistungskoeffizient für Gamma-submersion ist eine Zerfallszeit des Mutternuklids von 200 Sekunden angenommen worden. Der Dosisleistungskoeffizient für Gamma-submersion mit Berücksichtigung der Tochternuklide setzt sich zusammen aus dem Dosisleistungskoeffizient (ohne Berücksichtigung einer Zerfallszeit) des Mutternuklids und dem Anteil der Tochternuklide, die während der Zerfallszeit von 200 Sekunden gebildet worden sind.

Der Faktor f für Gamma-submersion 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.

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

Es sind die Dosiskoeffizienten aus der im Bundesanzeiger vom 23. Juli 2001 bekannt gegebenen Zusammenstellung der Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition – Teil II: Dosiskoeffizienten bei innerer Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung – zu verwenden.

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

Tabelle 2: Verzehrsraten

Mittlere Verzehrsraten der Referenzpersonen (kg · a ⁻¹)							
1	2	3	4	5	6	7	8
Altersgruppe	≤1 Jahr	>1 - ≤2 Jahre	>2 - ≤7 Jahre	>7 - ≤12 Jahre	>12 - ≤17 Jahre	>17Jahre	
Lebensmittel							
Trinkwasser	55 ²	100	100	150	200	350	2
Säuglingsmilch (Milchfertigprodukte mit Trinkwasser)	145 ³	–	–	–	–	–	3
Milch, Milchprodukte	45	160	160	170	170	130	3
Fisch ⁴	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

² Zur jährlichen Trinkwassermenge des Säuglings von 55 kg kommen 115 kg, wenn angenommen wird, dass der Säugling nicht gestillt wird, sondern nur Milchfertigprodukte erhält, die überregional erzeugt werden und als nicht kontaminiert anzusetzen sind. Dabei ist angenommen, dass 0,2 kg Konzentrat (entspricht 1 l Milch) in 0,8 l Wasser aufgelöst werden.

³ Zur Berechnung der Strahlenexposition durch den Verzehr von Muttermilch sind die transferierten Bruchteile im Anhang 1, Tabelle 4a in Verbindung mit der Gleichung (4.14a) anzusetzen. Je nach Nuklidzusammensetzung ist die ungünstigste Ernährungsvariante zugrunde zu legen.

⁴ Der Anteil von Süßwasserfisch am Gesamtfischverzehr beträgt im Mittel ca. 17 % und ist den regionalen Besonderheiten anzupassen.

Zur Berücksichtigung der 95%-Perzentile der Verzehrswerten der Referenzpersonen sind die mittleren Verzehrswerten mit den Faktoren der Spalte 8 zu multiplizieren.

Es ist nicht zulässig, aus dem 95%-Perzentil der Verzehrswerte von Muttermilch ($435 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$) in Verbindung mit der Annahme einer Stilldauer auf die täglich verzehrte Menge von Muttermilch zu schließen. Das 95%-Perzentil der Verzehrswerte von Muttermilch wird überwiegend durch unterschiedliche Stilldauern und nur in geringem Maß durch unterschiedliche Tagesmengen der verzehrten Muttermilch bestimmt.

Tabelle 3: Atemraten

Zeitintervall k	Atemrate \dot{V}_k in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$					
	≤ 1 Jahr	$>1 - \leq 2$ Jahre	$>2 - \leq 7$ Jahre	$>7 - \leq 12$ Jahre	$>12 - \leq 17$ Jahre	>17 Jahre
0 bis 8 h	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
größer als 8 Stunden	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 4: Transferdaten zur Berechnung des Radionuklidtransportes in pflanzliche Produkte, in die Milch und in das Fleisch

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}	T_r^{Pf}	T_r^{Mi}	T_r^{Fl}
	in $\frac{Bq / kg FM}{Bq / kg TM}$ (-)	in $\frac{Bq / kg FM}{Bq / kg TM}$ (-)	in (d/kg Milch)	in (d/kg Fleisch)
Be	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
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	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
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	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$

Element	T_r^{Wd}	T_r^{Pf}	T_r^{Mi}	T_r^{Fl}
	in	in	in	in
	$\frac{Bq / kg FM}{Bq / kg TM}$	$\frac{Bq / kg FM}{Bq / kg TM}$	(d/kg Milch)	(d/kg Fleisch)
	(-)	(-)		
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	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
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 4a: Transferierte Bruchteile 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 transferierte Bruchteile für den Ingestionspfad ($f_r^{MM,g}$) oder den Inhalationspfad ($f_r^{MM,h}$) vorliegen, so sind diese so zugrunde zu legen, dass bei dem Gesamtergebnis eine Unterschätzung der Strahlenexposition nicht zu erwarten ist. Die transferierten Bruchteile $f_r^{MM,g}$ und $f_r^{MM,h}$ dürfen den Wert 1 nicht überschreiten.

Element	$f_r^{MM,g}$ ⁵⁾	$f_r^{MM,h}$ ⁵⁾
H	0,4	0,1 ⁶⁾ /0,4 ⁷⁾ / 0,004 ⁸⁾ /4 · 10 ⁻⁵ ⁹⁾
Be	0,005	0,09
C	0,3	0,09 ⁶⁾ 0,1 ¹⁰⁾ /0,3 ¹¹⁾
F	0,009	0,003
Na	0,07	0,02
Mg	0,09	0,05
Al	0,03	0,2
Si	0,2	0,2
P	0,09	0,04
S	0,2	0,06 ¹²⁾ /0,2 ¹³⁾ /0,1 ¹⁴⁾
Cl	0,07	0,02
K	0,3	0,09
Ca	0,3	0,3
Sc	0,09	0,01
V	0,02	0,2
Cr	0,2	0,3
Mn	0,002	0,004
Fe	0,03	0,09
Co	0,06	0,2
Ni	0,09	0,2 ⁶⁾ /1 ¹⁵⁾
Cu	0,2	0,1
Zn	0,2	0,1
Ga	0,03	0,2
Ge	1	0,4
As	0,009	0,004
Se	0,2	0,07
Br	0,03	0,01
Rb	0,3	0,1
Sr	0,09	0,08

⁵ Der Übergang in die Muttermilch wird in der Literatur üblicherweise durch Transferfaktoren quantifiziert

⁶ Schwebstoffe

⁷ HTO und OBT

⁸ Tritiiertes Methan

⁹ Elementares Tritium

¹⁰ CO

¹¹ CO₂ und Kohlenstoffdampf

¹² Schwebstoffe (anorganisch)

¹³ CS₂

¹⁴ SO₂

¹⁵ Nickelcarbonyl

Element	$f_r^{MM,g}$ ⁵⁾	$f_r^{MM,h}$ ⁵⁾
Y	0,03	0,09
Zr	0,06	0,2
Nb	0,02	0,2
Mo	0,02	0,006
Tc	0,5	0,3
Ru	0,2	0,2 ⁶⁾ /1 ¹⁶⁾
Rh	0,3	0,2
Pd	0,3	0,2
Ag	0,3	0,2
Cd	0,2	0,2
In	0,02	0,2
Sn	0,003	0,04
Sb	0,03	0,09
Te	0,3	0,3 ⁶⁾ /1 ¹⁷⁾
I	0,5	0,2 ⁶⁾ /0,5 ¹⁸⁾ /0,4 ¹⁹⁾
Cs	0,3	0,09
Ba	0,02	0,02
La	0,03	0,2
Ce	0,03	0,2
Pr	0,03	0,09
Nd	0,03	0,09
Pm	0,03	0,09
Sm	0,03	0,09
Eu	0,03	0,09
Gd	0,03	0,2
Tb	0,03	0,09
Dy	0,03	0,09
Ho	0,03	0,09
Er	0,03	0,09
Tm	0,03	0,09
Yb	0,03	0,09
Lu	0,03	0,09
Hf	0,002	0,2
Ta	0,001	0,09
W	0,3	0,3
Re	0,8	0,3
Os	0,09	0,2
Ir	0,09	0,2
Pt	0,09	0,2
Au	0,1	0,3
Hg	0,2	0,2 ¹²⁾ /0,7 ²⁰⁾ /0,1 ²¹⁾
Tl	1	0,4
Pb	0,09	0,1
Bi	0,05	0,2
Po	0,5	0,3
At	1	0,4
Ra	0,2	0,3
Ac	5 · 10 ⁻⁴	0,2
Th	0,03	0,2

⁵ Der Übergang in die Muttermilch wird in der Literatur üblicherweise durch Transferfaktoren quantifiziert

⁶ Schwebstoffe

¹⁶ Ruthentetroxid

¹⁷ Elementares Tellur

¹⁸ Elementares Iod

¹⁹ Methyljodid

²⁰ Quecksilberdampf

²¹ Schwebstoffe (organisch)

Element	$f_r^{MM,g}$ ⁵⁾	$f_r^{MM,h}$ ⁵⁾
Pa	$5 \cdot 10^{-4}$	0,09
U	0,02	0,2
Np	$5 \cdot 10^{-4}$	0,2
Pu	$5 \cdot 10^{-4}$	0,2
Am	$5 \cdot 10^{-4}$	0,2
Cm	$5 \cdot 10^{-4}$	0,2
Bk	$5 \cdot 10^{-4}$	0,09
Cf	$5 \cdot 10^{-4}$	0,09

Tabelle 5: Verweilkonstante der Radionuklide aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten

Element	$\lambda_{M,r}$ in s^{-1}	
	Acker	Weide
Tc	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-8}$
Sr, Ru, I	10^{-9}	$2 \cdot 10^{-9}$
Cs	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-10}$
Aktiniden	10^{-11}	$2 \cdot 10^{-11}$

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.

⁵ Der Übergang in die Muttermilch wird in der Literatur üblicherweise durch Transferfaktoren quantifiziert

Anhang 2 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Berechnung der Windgeschwindigkeit in effektiver Emissionshöhe (Kapitel 4.4)

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

$$u = u_1 \cdot \left(\frac{H_e}{z_1} \right)^m \quad \text{für } H_e \text{ größer als oder gleich } 10 \text{ m}$$

$$u = u_1 \quad \text{für } H_e \text{ kleiner als } 10 \text{ m}$$

Für die Windgeschwindigkeit u_1 ist für alle Diffusionskategorien ein Wert von $u_1 = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ einzusetzen.

In den oben aufgeführten Formeln bedeuten:

u_1 : Windgeschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ in Bezugshöhe $z_1 = 10 \text{ m}$ oberhalb des mittleren Störniveaus

$$u_1 = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

H_e : effektive Emissionshöhe in m

m : Exponent des vertikalen Windgeschwindigkeitsprofils

Für den Exponenten m sind die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte anzuwenden:

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

Eine Korrektur der effektiven Emissionshöhe aufgrund besonderer orographischer Verhältnisse darf bei der Berechnung der Windgeschwindigkeit nicht berücksichtigt werden.

Anhang 3 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Daten und Interpolationsverfahren zur Berechnung der Ausbreitungsparameter $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ (Kapitel 4.4)

Für die Ausbreitungsparameter wird der Ansatz

$$\sigma_l(x) = p_l \cdot x^{q_l}, \quad l = y, z$$

gemacht. Hierin bedeuten:

$\sigma_l(x)$: Ausbreitungsparameter in m

p_l, q_l : Koeffizient (p_l) und Exponent (q_l) zur Berechnung der Ausbreitungsparameter, p_l in $m^{(1-q_l)}$, q_l dimensionslos

x : Quelldistanz in m

Die Koeffizienten und Exponenten für die Basishöhen 50 m, 100 m und 180 m sind in der folgenden Tabelle enthalten:

effektive Emissionshöhe H_e	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 die effektiven 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 Emissions-

höhen zwischen 50 m und 100 m sowie zwischen 100 m und 180 m erfolgt eine geometrische Interpolation zwischen den tabellierten Werten von p_i und eine lineare Interpolation zwischen den tabellierten Werten von q_i .

Es ist:

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

$$p_{l,i} = p_{l,o}^{\alpha_1} \cdot p_{l,u}^{\alpha_2}$$

mit

$$\alpha_1 = \frac{H_i - H_u}{H_o - H_u}$$

$$\alpha_2 = \frac{H_o - H_i}{H_o - H_u}$$

In den oben aufgeführten Formeln bedeuten:

$p_{l,i}, q_{l,i}$: Koeffizienten und Exponenten für σ_l 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

$p_{l,o}, q_{l,o}$: Koeffizienten und Exponenten für σ_l für die Basishöhe H_o

$p_{l,u}, q_{l,u}$: Koeffizienten und Exponenten für σ_l für die Basishöhe H_u

Anhang 4 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Daten zur Berechnung der trockenen und nassen Ablagerung (Kapitel 4.4.2 und 4.4.3)

Tabelle 1: Ablagerungsgeschwindigkeiten zur Berechnung der trockenen Ablagerung (Kapitel 4.4.2)

Ablagerungsgeschwindigkeit v_g in $m \cdot s^{-1}$	
10^{-2}	elementares Iod
10^{-4}	organisch gebundenes Iod
$1,5 \cdot 10^{-3}$	Schwebstoffe

Tabelle 2: Niederschlagsintensität I zur Berechnung des Washoutkoeffizienten (Kapitel 4.4.3)

Niederschlagsintensität I in $mm \cdot h^{-1}$	Störfall-Zeitintervall
5	0 bis 8 Stunden
2	8 bis 24 Stunden
1	24 bis 72 Stunden
0,5	3 bis 7 Tage

Tabelle 3: Washoutkoeffizient Λ_0 für die Niederschlagsintensität I_0 (Kapitel 4.4.3)

Washoutkoeffizient Λ_0 für die Niederschlagsintensität I_0 in s^{-1}	
$7 \cdot 10^{-5}$	elementares Iod
$7 \cdot 10^{-7}$	organisch gebundenes Iod
$7 \cdot 10^{-5}$	Schwebstoffe

Anhang 5 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft (Kapitel 4.4.4)

Dosisaufbaufaktor für Gammasubmersion

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

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

mit

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

Die Koeffizienten $b_{1,m}$ sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben:

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

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

Anhang 6 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gamma-submersion (Kapitel 4.4.4)

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

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

Die Koeffizienten $a_{k,m}$ für die Energie 1 MeV sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben:

$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 0$	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 7 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Korrekturvorschriften zur Berücksichtigung von Gebäudeeinflüssen, besonderen orographischen Verhältnissen und Kühlturmeinflüssen in der Ausbreitungsrechnung (Kapitel 4.4)

Gebäudeeinfluss

Bei niedrigen effektiven Emissionshöhen H_e in der Nähe von Gebäuden kann die Abluft durch die Gebäudeumströmung näher zum Boden gelangen als im ungestörten Fall. Dies ist gegeben, falls $H_e < (H_G + I_G)$ und die Quelle sich auf dem Dach des Gebäudes, irgendwo im Abstand von $I_G/4$ vom Gebäude entfernt oder weniger als $3 I_G$ direkt in oder entgegen der Ausbreitungsrichtung vom Gebäude entfernt befindet. I_G ist der kleinere Wert von Gebäudebreite b_G und Gebäudehöhe H_G . Sind obige Voraussetzungen erfüllt, so ist als effektive Emissionshöhe die wie folgt definierte Höhe h' zu verwenden:

$$\text{a) } H_e > H_G \quad h' = 0,5 \cdot (3H_e - (H_G + I_G))$$

$$\text{b) } H_e \leq H_G \quad h' = H_e - 0,5I_G$$

Ist h' kleiner als $I_G/2$, so ist $h' = I_G/2$ zu setzen. Ist h' kleiner als H_G , müssen die Ausbreitungsparameter σ_y und σ_z durch die Größen Σ_y und Σ_z ersetzt werden.

$$\Sigma_y(x) = \left\{ \sigma_y^2(x) + \frac{I_G^2}{\pi} \right\}^{0,5}$$

$$\Sigma_z(x) = \left\{ \sigma_z^2(x) + \frac{I_G^2}{\pi} \right\}^{0,5}$$

Eine realistischere Abschätzung des Einflusses umliegender Gebäude kann aus Windkanalversuchen gewonnen werden.

Besondere orographische Verhältnisse

Das Ausbreitungsmodell gemäß Kapitel 4.4 geht von der Annahme aus, dass das Gelände ausreichend eben ist und somit die räumliche Konstanz von Windrichtung und Windgeschwindigkeit nicht wesentlich gestört ist. Dämme, Wälle und sonstige kleine Erhebungen sind der Bebauung und dem Bewuchs zuzurechnen. Das Gelände kann als ausreichend eben angesehen werden, solange der Neigungswinkel des Geländes nicht größer als 5° ist und damit eine bodenparallele Strömung erhalten bleibt.

Im Falle von Geländeformen, die über den Neigungswinkel von 5° hinausgehen, kann der Einfluss auf die Ausbreitung mit Hilfe von theoretischen (Strömungs- und Ausbreitungsmodelle, die die Orographie berücksichtigen) und experimentellen Untersuchungen (z. B. Windkanalexperimente) berücksichtigt werden. Wenn solche Untersuchungen nicht vorliegen, sind die Ausbreitungsfaktoren wie folgt zu modifizieren:

1. Diffusionskategorien A bis D

a) $h(x,y=0) < H_e/2$

$$\chi_k = \frac{I}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(H_e - h(x,0))^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right]$$

b) $h(x,y=0) \geq H_e/2$

$$\chi_k = \frac{I}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\left(\frac{H_e}{2}\right)^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right]$$

2. Diffusionskategorien E und F

a) $h(x,y=0) < H_e$

$$\chi_k = \frac{I}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(H_e - h(x,0))^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right]$$

b) $h(x,y=0) \geq H_e$

$$\chi_k = \frac{I}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right]$$

Hierbei bedeuten zusätzlich zu Kapitel 4.4.1:

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

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

Kühlturmeinfluss

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

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 sie 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 nicht anwendbar sind, so ist der Einfluss des Kühlturms auf die Ausbreitung der Abluftfahne durch Windkanalversuche zu bestimmen.

Anhang 8 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Berechnung der effektiven Emissionshöhe bei gleichzeitiger Emission von radioaktiven Stoffen und größeren Wärmemengen (Kapitel 4.4.1)

Die Abluftfahnenüberhöhung \ddot{u} , welche zusammen mit der Emissionshöhe H die effektive Emissionshöhe H_e ergibt, wird aus dem emittierten virtuellen Wärmestrom M , der Quellentfernung x und der Windgeschwindigkeit u in Emissionshöhe nach den folgenden Formeln ermittelt. In diesen Formeln ist der virtuelle Wärmestrom M in MW, die Quellentfernung x in m und die Windgeschwindigkeit u in Emissionshöhe in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ einzusetzen; die Abluftfahnenüberhöhung ergibt sich dann in m.

a) Labile Temperaturschichtung (Diffusionskategorien A und B)

$$\ddot{u}_{la}(x) = 3,34 \cdot M^{1/3} \cdot x^{2/3} \cdot u^{-1}$$

mit $\ddot{u}_{la}(x) + H$ kleiner oder gleich 1 100 m

Für M größer 6 MW gilt zusätzlich:

$$x_{la,1}^{\max} = 288 \cdot M^{2/5}$$

$$\ddot{u}_{la,1}^{\max} = 146 \cdot M^{3/5} \cdot u^{-1}$$

mit $\ddot{u}_{la,1}^{\max} + H$ kleiner oder gleich 1 100 m

Für M kleiner oder gleich 6 MW gilt zusätzlich:

$$x_{la,2}^{\max} = 195 \cdot M^{5/8}$$

$$\ddot{u}_{la,2}^{\max} = 112 \cdot M^{3/4} \cdot u^{-1}$$

mit $\ddot{u}_{la,2}^{\max} + H$ kleiner oder gleich 1 100 m

b) Neutrale Temperaturschichtung (Diffusionskategorien C und D)

$$\ddot{u}_n(x) = 2,84 \cdot M^{1/3} \cdot x^{2/3} \cdot u^{-1}$$

mit $\ddot{u}_n(x) + H$ kleiner oder gleich 800 m

Für M größer 6 MW gilt zusätzlich:

$$x_{n,1}^{\max} = 210 \cdot M^{2/5}$$

$$\ddot{u}_{n,1}^{\max} = 102 \cdot M^{3/5} \cdot u^{-1}$$

mit $\ddot{u}_{n,1}^{\max} + H$ kleiner oder gleich 800 m

Für M kleiner oder gleich 6 MW gilt zusätzlich:

$$x_{n,2}^{\max} = 142 \cdot M^{5/8}$$

$$\ddot{u}_{n,2}^{\max} = 78,4 \cdot M^{3/4} \cdot u^{-1}$$

mit $\ddot{u}_{n,2}^{\max} + H$ kleiner oder gleich 800 m

c) Stabile Temperaturschichtung (Diffusionskategorien E und F)

$$\ddot{u}_{st}(x) = 3,34 \cdot M^{1/3} \cdot x^{2/3} \cdot u^{-1} \quad (4.A1)$$

Für Diffusionskategorie F gilt zusätzlich:

$$\begin{aligned} x_{st,1}^{\max} &= 104 \cdot u \\ \ddot{u}_{st,1}^{\max} &= 74,4 \cdot M^{1/3} \cdot u^{-1/3} \end{aligned} \quad (4.A2)$$

Für Diffusionskategorie E gilt zusätzlich:

$$\begin{aligned} x_{st,2}^{\max} &= 127 \cdot u \\ \ddot{u}_{st,2}^{\max} &= 85,2 \cdot M^{1/3} \cdot u^{-1/3} \end{aligned} \quad (4.A3)$$

Die nach einer der Gleichungen (4.A1), (4.A2) oder (4.A3) berechnete Abluftfahnenüberhöhung ist mit dem entsprechenden Überhöhungswert für die Diffusionskategorie D nach Punkt b) zu vergleichen. Der niedrigere der beiden Werte ist die Überhöhung.

d) Virtueller Wärmestrom

Der emittierte virtuelle Wärmestrom M in MW wird nach folgender Formel berechnet:

$$M = 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot R \cdot (T_v - 283) \cdot T/T_v$$

Es bedeuten:

- M: virtueller Wärmestrom in MW
- R: Volumenstrom der Abluft im Normzustand in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- T: Temperatur der Abluft in K
- T_v : virtuelle Temperatur in K
 $T_v = T \cdot (1 + 0,6 q \cdot 10^{-3})$

mit

- q: spezifische Feuchte der Abluft in $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
 (bei reinem Wasserdampf ist $q = 1,0 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Sind die Austrittsbedingungen der Emissionen nicht im einzelnen bekannt, ist eine Abluftfahnenüberhöhung nicht zu berücksichtigen.

Anhang 9 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

Methoden für die Durchführung probabilistischer Berechnungen (Kapitel 4.4.5)

Für die Durchführung probabilistischer Berechnungen zur Ermittlung der Strahlenexposition sind detaillierte Angaben über Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Diffusionskategorie und Niederschlag mit einer zeitlichen Auflösung von 1 h oder weniger über einen repräsentativen Zeitraum von mehreren Jahren erforderlich.

Berechnungsverfahren

Um den Ort der potentiellen Emission ist ein hinreichend feines Netz von Aufpunkten zu legen. Der Abstand der Gitterpunkte voneinander sollte nicht größer sein als die Hälfte der Quelldistanz des bodennahen Maximums des Kurzzeitbreitungs-faktors bei der Diffusionskategorie A für die angenommene effektive Emissionshöhe H_e . Die Größe des zu betrachtenden Gebietes sollte mindestens das 30-fache der effektiven Emissionshöhe H_e betragen.

Sodann ist das Zeitintervall ΔT , innerhalb dessen der Störfall abläuft, in M gleiche Zeitelemente τ_m mit einer Länge von höchstens einer Stunde einzuteilen. Für jedes Zeitelement τ_m ist an jedem Gitterpunkt die Summe der Dosen aus externer und interner Strahlenexposition für ein Organ oder Gewebe T zu berechnen. Anschließend sind die so ermittelten Dosen an allen Gitterpunkten über alle Zeitelemente M aufzuaddieren und der höchste Wert im Gitternetz zu bestimmen.

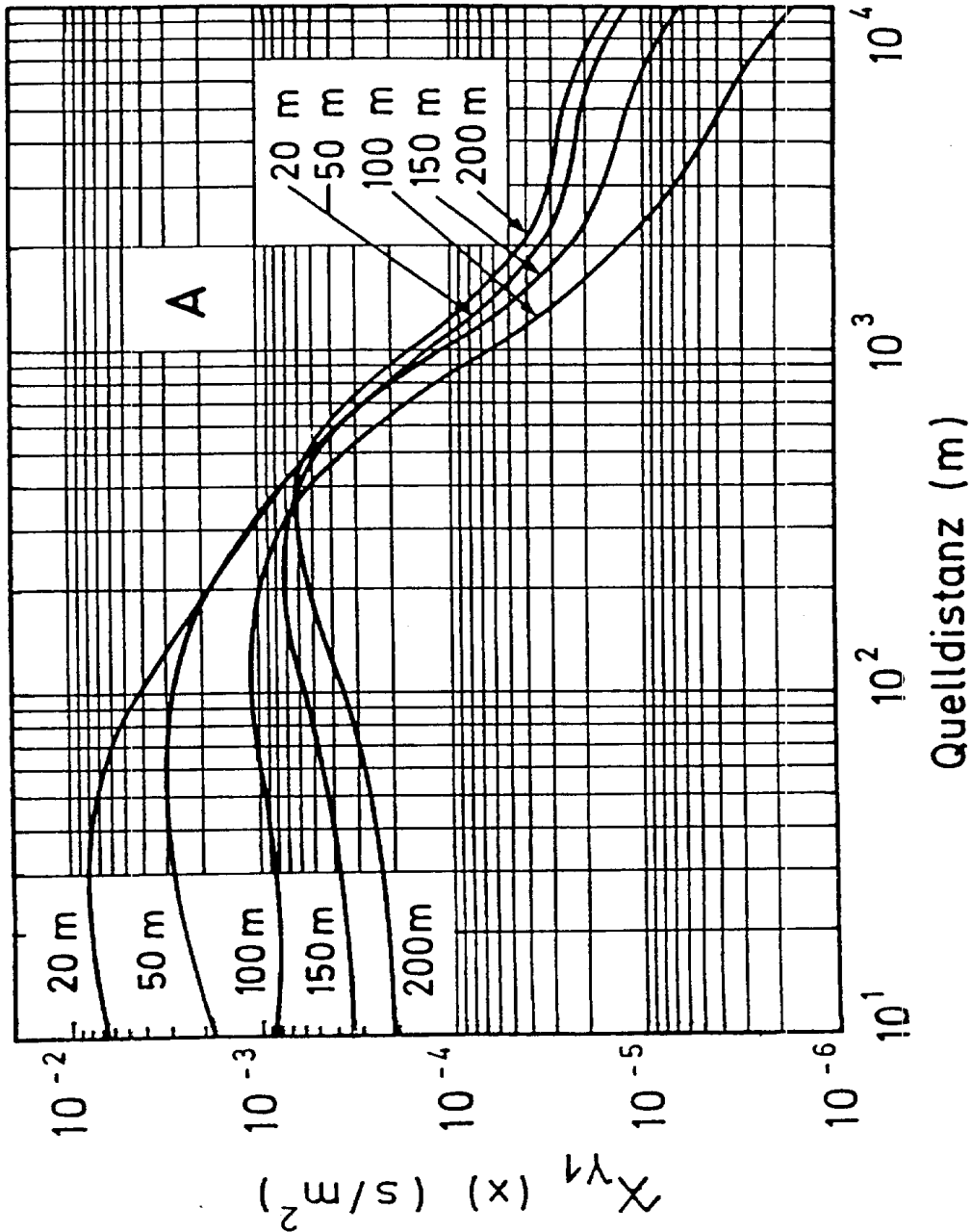
Die Ermittlung solcher Maximalwerte ist für eine hinreichende Anzahl von Wetterabläufen (Kombination von Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Diffusionskategorie und Niederschlag) durchzuführen. Es ist zu beachten, dass bestimmte typische Wetterabläufe, wie z. B. Tag/Nacht- oder Nacht/Tag-Übergänge, nur entsprechend ihrem statistischen Anteil an allen möglichen Wetterabläufen berücksichtigt werden.

Aus der Gesamtheit der Maximalwerte für alle Wetterabläufe ist eine Häufigkeitsverteilung zu erstellen. Aus dieser Verteilung ist schließlich jeweils der Wert abzulesen, unterhalb dessen 95% aller ermittelten Maximalwerte liegen.

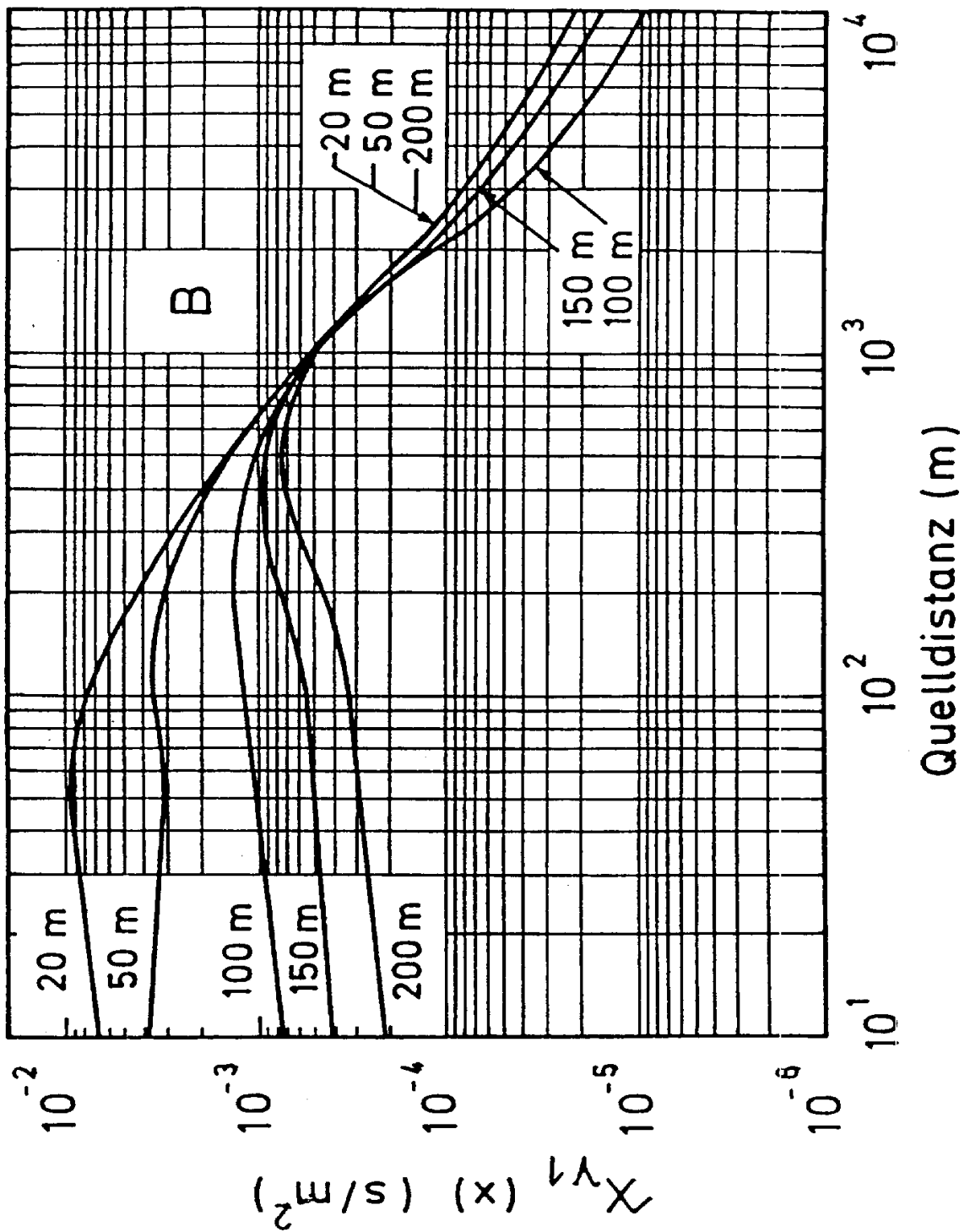
Für die Berechnung der Dosen sind der Kurzzeitbreitungs-faktor (Gl. 4.17), der Kurzzeit-Washoutfaktor (Gl. 4.22) sowie der Kurzzeitbreitungs-faktor für Gammasubmersion (Gl. 4.24) zusammen mit der jeweiligen Aktivitätsfreisetzung im Zeitelement τ_m anzuwenden.

Anhang 10 zum Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen

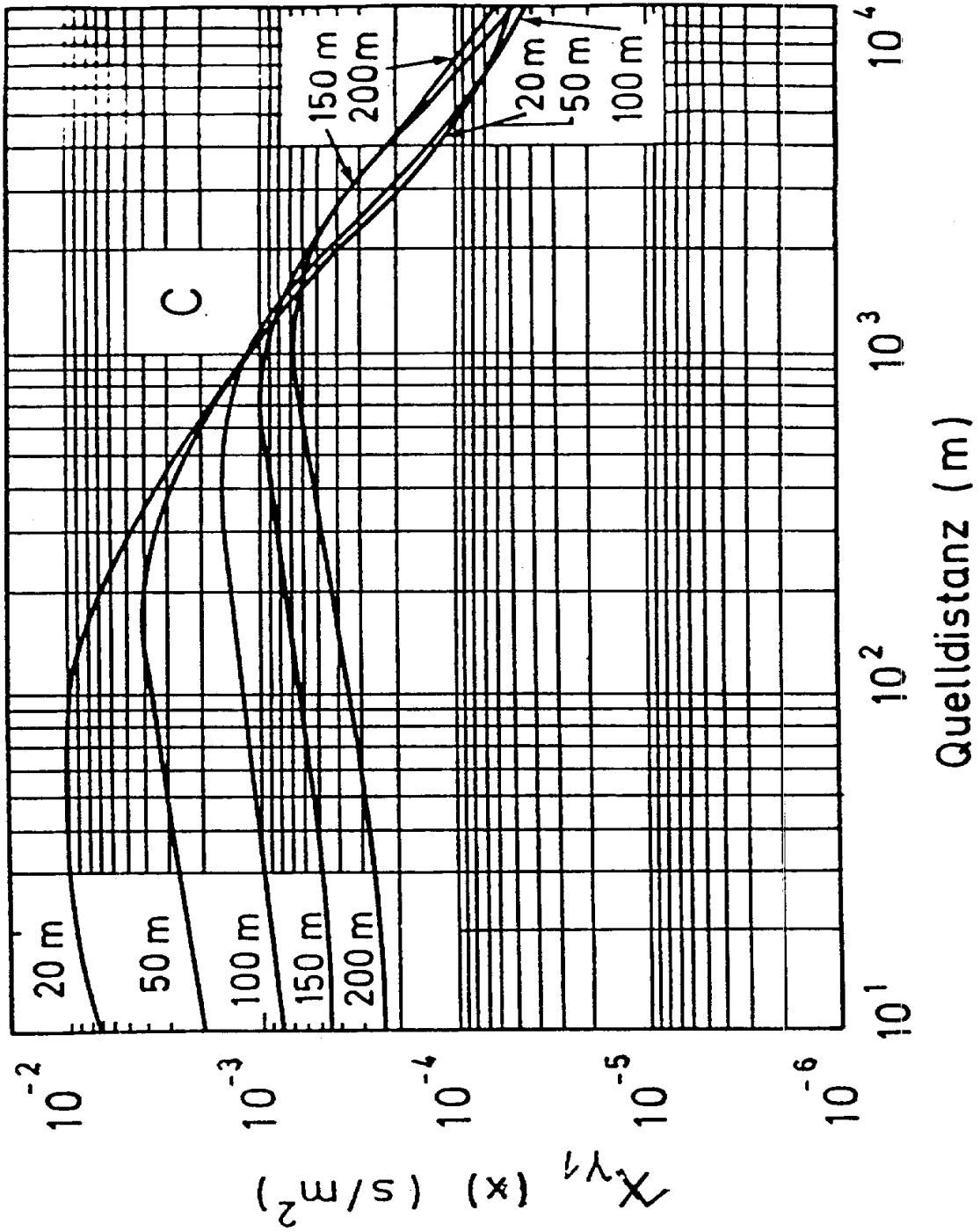
Abbildungen zur Berechnung der Kurzzeitausbreitungsfaktoren für Gamma-submersion mit dem vereinfachten Verfahren (Kapitel 4.4.4)



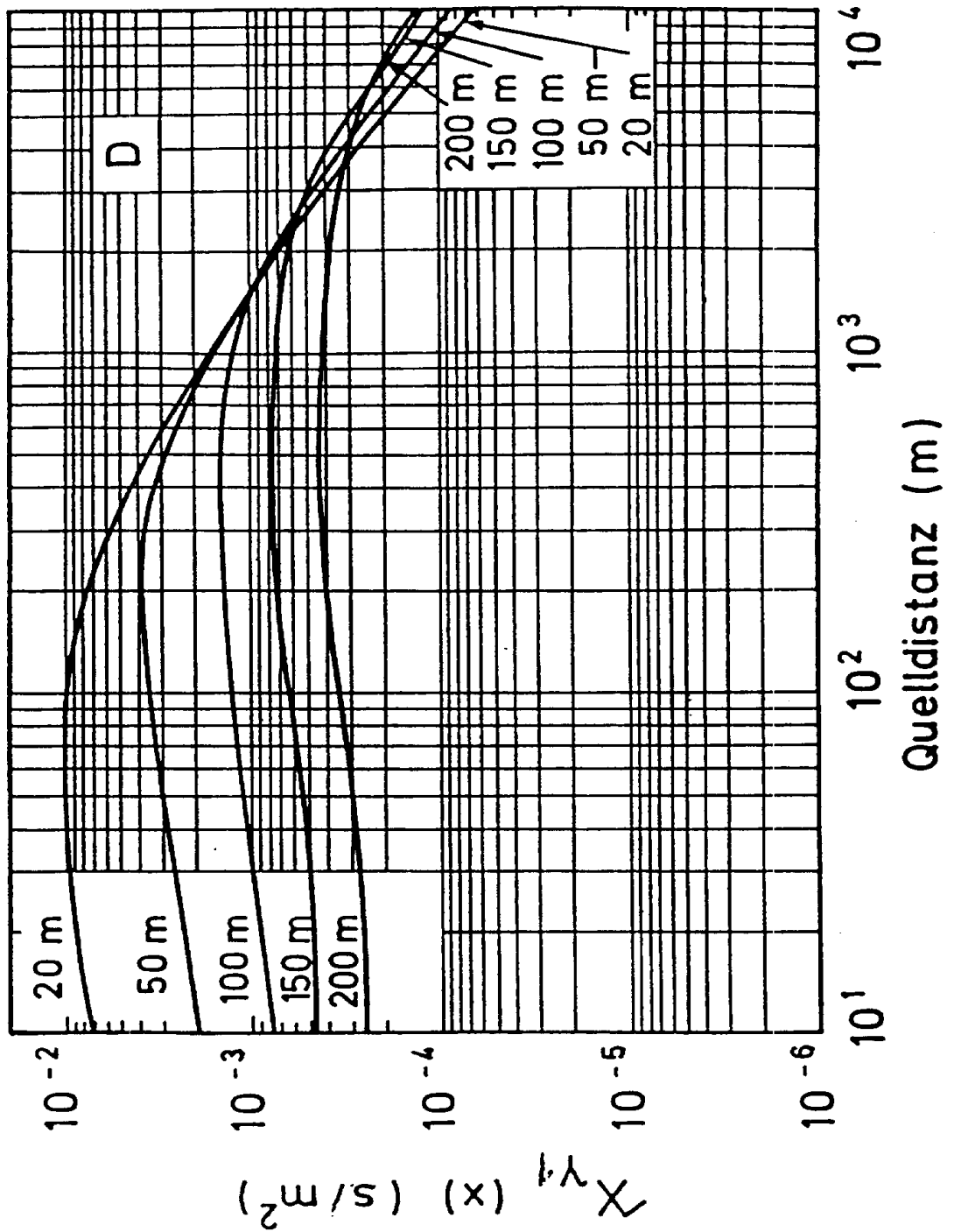
- Diffusionskategorie A -



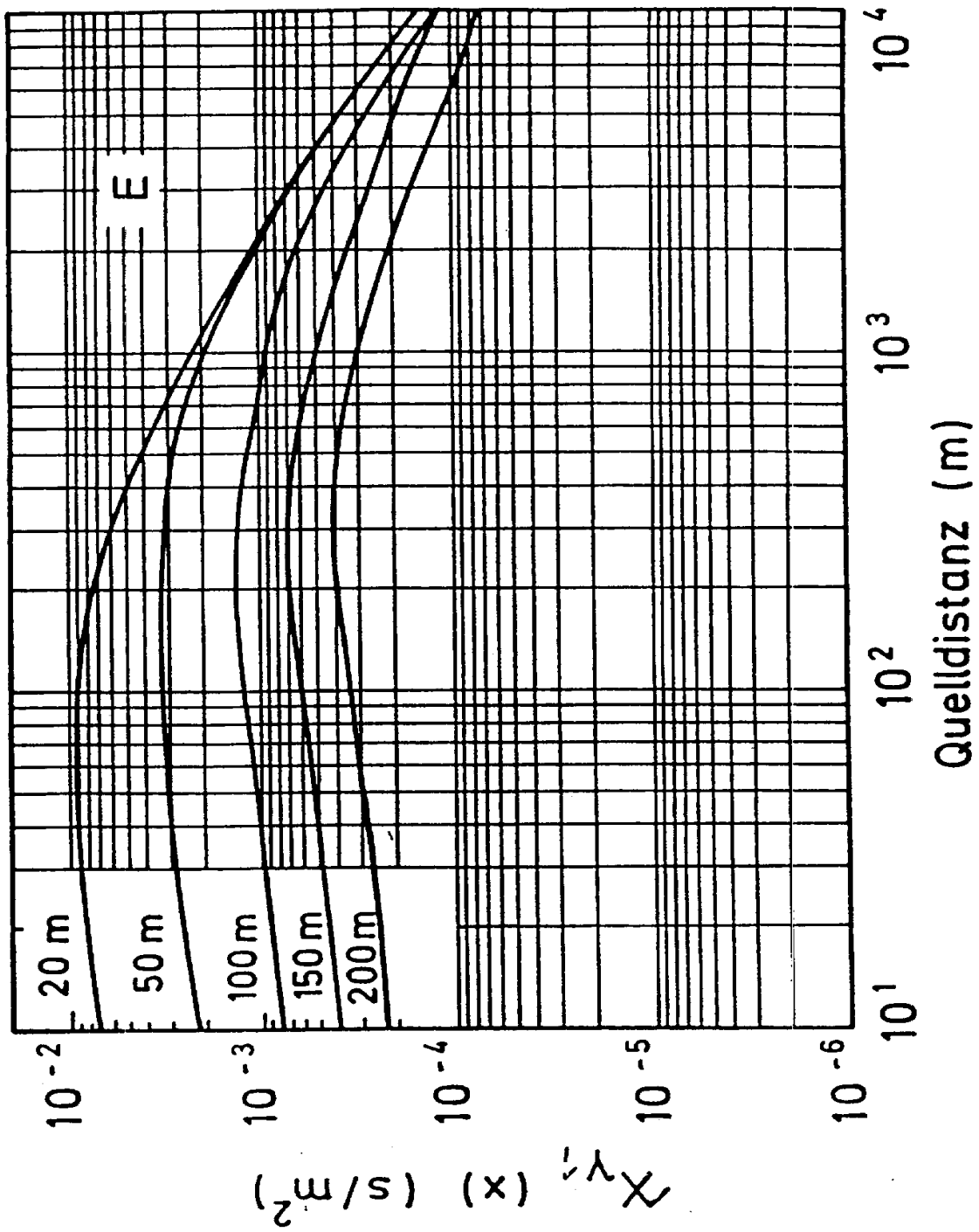
- Diffusionskategorie B -



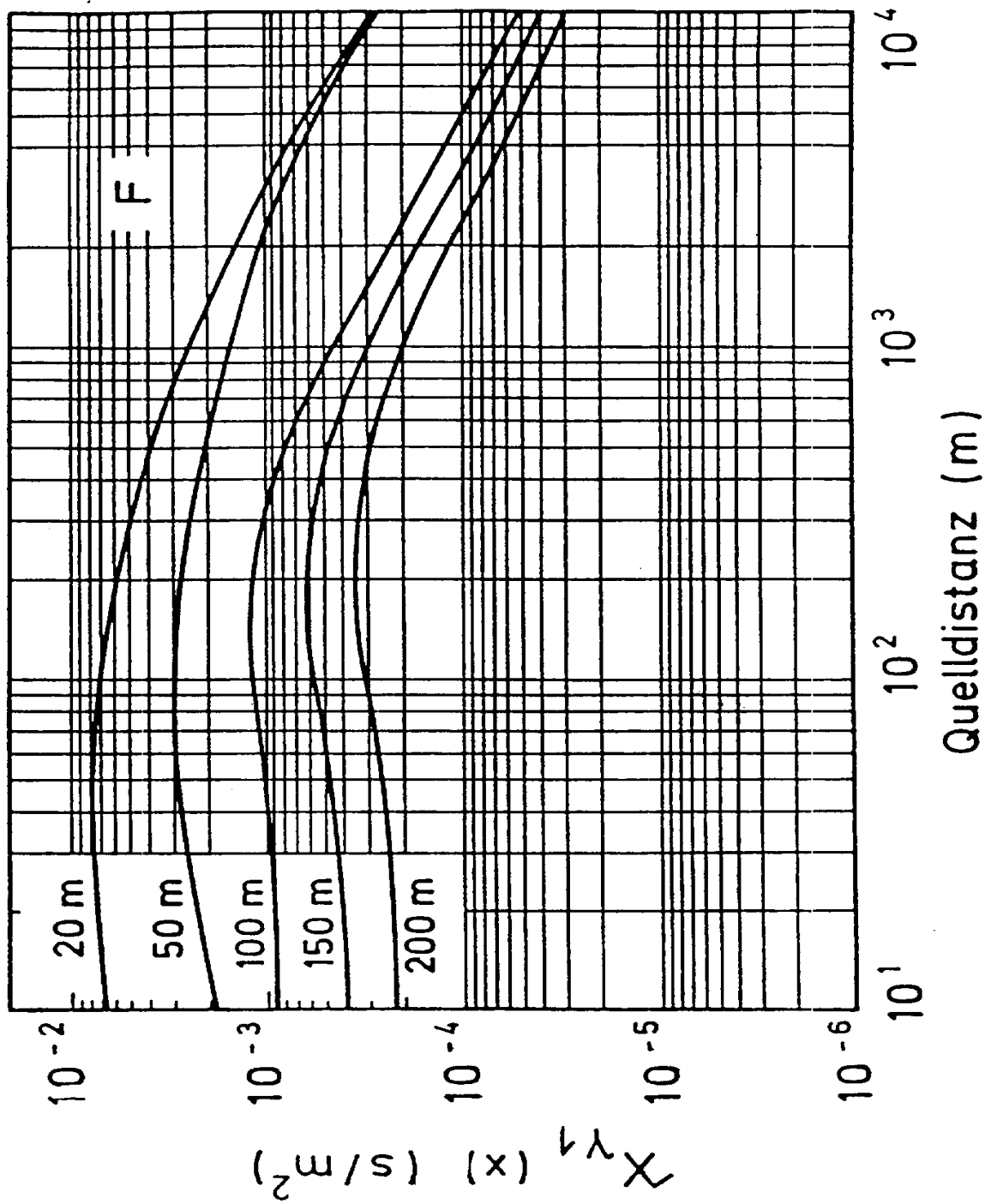
- Diffusionskategorie C -



- Diffusionskategorie D -



- Diffusionskategorie E -



- Diffusionskategorie F -