

ENSI-G14

Richtlinie für die
schweizerischen Kernanlagen

Ausgabe Februar 2008

(Änderung vom 8. März 2022)

Berechnung der
Strahlenexposition in der
Umgebung aufgrund von
Emissionen radioaktiver Stoffe
aus Kernanlagen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen

Ausgabe Februar 2008, Revision 1, Änderung vom 8. März 2022

Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen

ENSI-G14/deutsch (Original)

Inhalt

Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen

ENSI-G14/deutsch (Original)

1	Einleitung	1
2	Gegenstand und Geltungsbereich	1
3	Rechtliche Grundlagen	1
4	Grundregeln für die Dosisberechnungen	1
4.1	Abgabelimiten	2
4.2	Auslegungsstörfälle	3
4.3	Tatsächliche Abgaben	5
5	Ausbreitung radioaktiver Stoffe	6
5.1	Transport in der Luft	6
5.2	Ablagerung auf Boden und Pflanzen	6
5.3	Eindringen in den Boden	7
5.4	Transport mit dem Wasser	7
6	Expositionswege	8
6.1	Luftgetragene Emissionen	8
6.2	Ableitungen mit dem Wasser	10
6.3	Spezialfälle	11
7	Liste der Verweisungen	11
Anhang 1:	Ausbreitung, Ablagerung und Transfer radioaktiver Stoffe	13
Anhang 2:	Ablagerungsfaktoren für Boden und Pflanzenoberfläche	21
Anhang 3:	Nuklidaktivität auf dem und im Boden	25
Anhang 4:	Aktivität auf und in konsumierten resp. verfütterten Pflanzen	29
Anhang 5:	Formeln zur Berechnung der Dosen in der Umgebung	33
Anhang 6:	Einheiten und Zahlenwerte	63
Anhang 7:	Atemrate und Verzehrgeohnheiten der Umgebungsbevölkerung	69
Anhang 8:	Dosisfaktoren	71
Anhang 9:	Transferfaktoren	73

1 Einleitung

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) ist die Aufsichtsbehörde für die nukleare Sicherheit und Sicherung der Kernanlagen in der Schweiz. In seiner Eigenschaft als Aufsichtsbehörde oder gestützt auf einen Auftrag in einer Verordnung erlässt es Richtlinien. Richtlinien sind Vollzugshilfen, die rechtliche Anforderungen konkretisieren und eine einheitliche Vollzugspraxis erleichtern. Sie konkretisieren zudem den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Das ENSI kann im Einzelfall Abweichungen zulassen, wenn die vorgeschlagene Lösung in Bezug auf die nukleare Sicherheit und Sicherung mindestens gleichwertig ist.

2 Gegenstand und Geltungsbereich

Die Richtlinie ENSI-G14 legt die Methodik und die Randbedingungen fest, die bei der Berechnung der Strahlendosis der Bevölkerung in der Umgebung einer Kernanlage aus Abgaben radioaktiver Stoffe über Abluft und Abwasser zur Anwendung kommen.

Diese Richtlinie gilt für alle Kernanlagen in der Schweiz.

3 Rechtliche Grundlagen

Diese Richtlinie stützt sich auf Art. 70 Abs. 1 Bst. a des Kernenergiegesetzes vom 21. März 2003 (KEG; SR 732.1).

4 Grundregeln für die Dosisberechnungen

Die Dosisberechnungen erfolgen für eine fiktive, konservativ festgelegte kritische Personengruppe, für welche die folgenden Annahmen getroffen werden:

- a. Die Personen wohnen und arbeiten am Ort mit der grössten Gesamtdosis, die aus Immersion, Inhalation, Bodenstrahlung und Ingestion entsteht. Der gesamte in der Verzehrrate berücksichtigte Bedarf an Obst, Früchten, Gemüse, Milch und Fleisch wird von diesem Ort gedeckt (Hauptaufschlagpunkt). Dabei werden rein trockene (Fallout) und kombiniert trocken/nasse (Washout) Ablagerungen separat berücksichtigt.
- b. Die Personen decken ihren Trinkwasser- und Fischbedarf aus dem Fluss unterhalb der Anlage.

- c. Bei der Bestimmung des Ortes mit dem grössten Gesamtdosisbeitrag in der Umgebung werden Distanzen kleiner als 200 m zum Abgabeort nicht berücksichtigt.

Zur Berücksichtigung der Lebensgewohnheiten der kritischen Bevölkerungsgruppe wird, wenn möglich, von realistischen, sonst von konservativen Annahmen ausgegangen. So werden zum Beispiel bei den Verzehrraten keine speziellen Diäten betrachtet, sondern es wird von Zahlenwerten ausgegangen, die die mittleren Gewohnheiten der schweizerischen Bevölkerung widerspiegeln.

Für die übrigen notwendigen Parameter werden in der Literatur vorhandene Zahlenwerte verwendet. Sofern mehrere unterschiedliche Werte in der Literatur zu finden sind, wird derjenige Wert verwendet, der zu einer höheren Dosisabschätzung führt, wenn er nicht von vornherein für die vorliegende Situation als unrealistisch oder extrem unwahrscheinlich eingestuft werden muss.

Die Ausbreitung radioaktiver Stoffe ist in Kapitel 5, die berücksichtigten Expositionspfade sind in Kapitel 6 dargelegt.

4.1 Abgabelimiten

Die zulässigen Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umwelt werden primär für den Zeitraum eines Jahres als Jahresabgabelimiten, zusätzlich aber auch für kürzere Perioden als Kurzzeitabgabelimiten begrenzt. Mit der Festlegung von Kurzzeitabgabelimiten wird berücksichtigt, dass während kurzer Zeitabschnitte ungünstigere Ausbreitungsfaktoren vorliegen können als bei einer Mittelung über ein ganzes Jahr. Die Limiten werden gemäss Art. 112 der Strahlenschutzverordnung vom 26. April 2017 (StSV; SR 814.501) so festgesetzt, dass sowohl für Langzeit- als auch für Kurzzeitabgaben die quellenbezogenen Dosisrichtwerte nicht überschritten werden. Eine Kumulation der Dosis bei Ausschöpfung der Langzeit- und der Kurzzeitabgabelimiten wird nicht angenommen, da die Hauptaufschlagpunkte mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht am selben Ort liegen. Es werden folgende Voraussetzungen beachtet:

- a. Bei Langzeitabgaben wird die Dosis im ersten Jahr, welches auf fünfzig Betriebsjahre mit gleichmässigen alljährlich ausgeschöpften Jahresabgabelimiten folgt, bestimmt. Dabei wird angenommen, dass die Jahresabgabelimiten aller erlaubten Abgabepfade zusammen ausgeschöpft werden.

Bei einer Kurzzeitabgabe wird nach einer einmaligen kurzen Abgabe die in den folgenden 12 Monaten akkumulierte Dosis bestimmt. Dabei wird angenommen, dass alle Limiten (Edelgase, Aerosole, Iod etc.) der Anlage ausgeschöpft werden. Sind für eine Anlage mehrere Abgabestellen zugelassen (z. B. beim Paul Scherrer Institut), so wird angenommen, dass jeweils die Kurzzeitabgabelimiten einer einzelnen Abgabestelle ausgeschöpft werden.

- b. Für Langzeitabgaben werden trockene und nasse Ablagerung angenommen. Für Kurzzeitabgaben wird die Einhaltung des quellenbezogenen Dosisrichtwertes sowohl für rein trockene Ablagerung als auch für Wetterlagen mit nasser Ablagerung überprüft. Bei trockener Ablagerung wird von einer kurzen Abgabedauer (d. h. konstanten Wetterbedingungen) ausgegangen. Bei nassen Ablagerungen kann angenommen werden, dass die Abgabe während mindestens 24 Stunden gleichmässig erfolgt und Windrichtung und Wetterlage variieren, wie in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Deutschen Strahlenschutzverordnung beschrieben; dieser Tatsache wird dadurch Rechnung getragen, dass sowohl die Ausbreitungs- wie die Washout-Faktoren um einen Faktor 4 reduziert werden. Für Abgabestellen, bei denen eine Abgabe mit grosser Wahrscheinlichkeit während einer kurzen Abgabedauer erfolgt, ist eine solche Reduktion nicht zulässig. Bei nasser Ablagerung wird von einer mittleren Niederschlagsintensität von 2 mm/h ausgegangen. Dies entspricht der Niederschlagsintensität eines durchschnittlichen, in der Schweiz vorkommenden Dauerregens.
- c. Für die Berechnung der resultierenden Dosis wird von Standard-Nuklidgemischen ausgegangen, die anlagenspezifisch festgelegt werden.
- d. Für die kritische Bevölkerungsgruppe werden Kleinkinder, 10-jährige Kinder und Erwachsene betrachtet.
- e. Die Dosisberechnungen erfolgen durch das ENSI mit den in den Anhängen festgelegten Modellen und Parametern. Der Betreiber kann bei seinen Berechnungen zusätzliche standortspezifische Gegebenheiten, Messungen oder nachvollziehbare Betrachtungen (z. B. Windkanalexperimente, Wetterstatistik) für eine Anlage berücksichtigen. Diese Abweichungen sind dem ENSI zu begründen.

Für Situationen, die den Ansätzen unter Bst. b nicht entsprechen, ist in Ausnahmefällen auch bei Einhaltung der Abgabegrenzwerte eine Überschreitung des Dosisrichtwertes in der Umgebung möglich. Dies trifft insbesondere bei Abgaben während einer sehr kurzen Zeitperiode (< 24 Stunden) und/oder mit höherer Niederschlagsrate zu. Es ist nicht sinnvoll, diese Ausnahmefälle mit der Limitierung der Abgaben abzufangen. Das ENSI behält sich aber vor, zusätzliche tiefere Meldeschwellen für kritische Nuklidgruppen einzuführen. Dies erlaubt, wenn nötig, die Auswirkungen auf die Umgebung durch geeignete Massnahmen zu reduzieren.

4.2 Auslegungsstörfälle

Für die Auslegung einer Kernanlage gegen Störfälle gemäss Art. 7 und 8 KEV sind in Art. 123 StSV Dosiskriterien festgelegt. Bei den entsprechenden Dosisberechnungen werden die im Folgenden aufgezählten Festlegungen berücksichtigt:

- a. Dosisberechnungen werden vom Bewilligungsinhaber mit den in dieser Richtlinie angegebenen Modellen und Parametern durchgeführt. Zur Überprüfung der Einhaltung der Dosiskriterien wird grundsätzlich von einer Expositionszeit von einem Jahr unmittelbar nach dem Ereignis (ohne dosisreduzierende Schutzmassnahmen) ausgegangen.

Bei Störfällen mit einer Eintretenshäufigkeit kleiner als 10^{-2} pro Jahr kann für den Ingestionspfad davon ausgegangen werden, dass spätestens nach zwei Tagen ein Ernte- und Weideverbot erlassen würde. Bei den Berechnungen darf unterstellt werden, dass nur innerhalb der ersten 48 Stunden nach Störfalleintritt aus dem betroffenen Gebiet eine nicht überwachte Ernte und Konsum von kontaminierten Nahrungsmitteln erfolgt.

Bei Störfällen mit einer Eintretenshäufigkeit kleiner als 10^{-6} pro Jahr (auslegungsüberschreitend) darf mit dosisreduzierenden Massnahmen gerechnet werden. Bei der Berücksichtigung des Ingestionspfades wird unterstellt, dass nur innerhalb der ersten 24 Stunden nach Störfalleintritt im betroffenen Gebiet eine nicht überwachte Ernte und ein Konsum von kontaminierten Nahrungsmitteln erfolgen. Zudem wird bei den Berechnungen von einer minimalen Abwinddistanz von 500 m ausgegangen.

- b. Zur Ermittlung der maximalen Dosis werden Berechnungen für verschiedene Abwinddistanzen und Stabilitätsklassen der Atmosphäre bei trockener und nasser Ablagerung durchgeführt und die jeweils ungünstigsten Resultate verwendet. In Anlehnung an die übliche Praxis wird eine konstante Windgeschwindigkeit von 1 m/s angenommen. Ferner wird davon ausgegangen, dass es während der ersten 8 Stunden ständig mit einer mittleren Niederschlagsintensität von 2 mm/h regnet. Bei länger dauernden Freisetzungen radioaktiver Stoffe kann davon ausgegangen werden, dass Windrichtung und Wetterlage variieren. Für diese Fälle kann ein Modell mit zeitlich gestaffelten Ausbreitungs- und Auswaschbedingungen verwendet werden. Die Reduktionsfaktoren für die Ausbreitungs- und Washout-Faktoren sowie für die Niederschlagsintensität sind: Faktor 2 für die Zeit zwischen 8 und 24 Stunden, Faktor 4 für die Zeit zwischen 24 und 72 Stunden und Faktor 8 für die Zeit danach (Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Deutschen Strahlenschutzverordnung).
- c. Die Quellterme (d. h. Annahmen über die Menge, nuklidspezifische Zusammensetzung und das Zeitverhalten der freigesetzten radioaktiven Stoffe) werden je nach Störfall spezifisch angesetzt. Die angenommene Abgabedauer sowie der Freisetzungspfad (Kamin oder andere Anlageteile) hängen vom angenommenen Störfall ab.
- d. Die Ermittlung der maximalen Dosis erfolgt für eine Person, die sich während des Wolkendurchzugs am ungünstigsten Ort aufhält und danach am Ort mit

der grössten Gesamtdosis arbeitet, wohnt und ihren gesamten Bedarf an Nahrungsmitteln von diesem Ort deckt.

Es wird speziell darauf hingewiesen, dass für die Dosisberechnungen bei Auslegungstörfällen auch der Expositionspfad „Inhalation wieder aufgewirbelter Stoffe“ berücksichtigt wird.

- e. Für die kritische Bevölkerungsgruppe werden Kleinkinder, 10-jährige Kinder und Erwachsene betrachtet.
- f. Die Dosisberechnungen werden mit den in den Anhängen 1 bis 5 dieser Richtlinie angegebenen Modellen und Parametern durchgeführt. Es können auch andere, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Berechnungsmodelle unter Berücksichtigung der Punkte a bis e angewandt werden (z. B. Abreicherung der radioaktiven Wolke durch radioaktiven Zerfall und Ablagerung, Aufbau von Tochternukliden, Reflexion an einer Inversionsschicht).

4.3 Tatsächliche Abgaben

Die Berechnung der Dosen erfolgt für den Normalbetrieb zur Abschätzung der ungünstigsten Auswirkungen der Abgaben auf die Umgebung und zur Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen gemäss Strahlenschutzverordnung und Richtlinie ENSI-G15. Für diese Berechnung werden dabei die hier beschriebenen Modelle verwendet. Liefert ein Pfad einen Dosisbeitrag von weniger als 10^{-6} Sv (1 μ Sv) pro betrachtetes Ereignis, so wird der resultierende Zahlenwert für Berechnungen im Normalbetrieb nicht mehr explizit ausgewiesen.

Im Ereignisfall dienen die Dosisberechnungen der Beurteilung der Lage und der Entscheidung über Schutzmassnahmen gemäss dem Dosismassnahmenkonzept (DMK) der Verordnung über den Bevölkerungsschutz vom 11. November 2020 (Bevölkerungsschutzverordnung, BevSV; SR 520.12). Liegen für benötigte Daten- resp. Parametersätze keine spezifischen Messwerte oder Informationen vor, so werden die Berechnungen für erste Dosisabschätzungen mit Hilfe der hier beschriebenen Modelle und Parameter für Kurzzeitabgaben durchgeführt, wobei die Festlegungen des DMK berücksichtigt werden (z. B. zu berücksichtigende Expositionspfade). Sobald möglich werden für Dosisberechnungen die aktuelle Situation berücksichtigt und reale Messdaten verwendet (z. B. meteorologische Daten sowie saisonale Einflussparameter). Zudem werden Verfeinerungen (aufgrund von Messdaten oder anderen zusätzlichen Informationen) berücksichtigt oder für die vorliegende Situation besser geeignete Modelle angewendet.

5 Ausbreitung radioaktiver Stoffe

5.1 Transport in der Luft

Die Modellierung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe erfolgt mit einem höhenkorrigierten Gaussmodell gemäss der Neufassung des Kapitels 4 „Berechnung der Strahlenexposition“ der Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR der Deutschen Strahlenschutzverordnung, IAEA Safety Series No. 50-SG-S3, dem IAEA Safety Standard NS-G-3.2 sowie dem IAEA Safety Report Series No. 19. Die Ausbreitung wird dabei mit Hilfe von orts- und zeitabhängigen Ausbreitungsfaktoren χ , welche als Verhältnis zwischen örtlicher Nuklidkonzentration in der Luft (C_L) und Abgaberate (\dot{Q}) definiert sind, beschrieben. Es gilt $C_L = \dot{Q} \cdot \chi$. In der Realität werden für Berechnungen, d. h. insbesondere für Langzeitabgaben, meistens zeitgemittelte Ausbreitungsfaktoren χ verwendet. Für Kurz- resp. Langzeitabgaben ergeben sich daher unterschiedliche Ausbreitungsfaktoren χ . Die Herleitung des Kurzzeitausbreitungsfaktors χ_K beruht auf der Annahme einer kurzen Abgabedauer mit gleichen meteorologischen Bedingungen (vgl. Kapitel 4) während der Abgabe, diejenige des Langzeitausbreitungsfaktors χ_L auf homogenen Abgaben während mindestens eines Jahres und Mittelung des Ausbreitungsfaktors mit Hilfe der Wetterstatistik über diese Zeitperiode. Die Formeln zur Berechnung von Ausbreitungsfaktoren und die für die schweizerischen Kernkraftwerke verwendeten Zahlenwerte sind in Anhang 1 zusammengestellt.

5.2 Ablagerung auf Boden und Pflanzen

Bei der Ablagerung auf Boden und Pflanzen muss zwischen trockener und nasser Ablagerung unterschieden werden:

- a. Bei trockener Ablagerung (Fallout) ist die zeitgemittelte Ablagerungsrate direkt proportional zur örtlichen Nuklidkonzentration C_L in der Luft auf Bodenhöhe am interessierenden Punkt. Der Proportionalitätsfaktor ist durch die sogenannte Ablagerungsgeschwindigkeit v_g gegeben. Wegen dieser direkten Proportionalität fallen die Orte der maximalen Nuklidkonzentration in der bodennahen Luft, der maximalen Ablagerung auf den Boden und der maximal akkumulierten Dosis in diesem Fall zusammen.
- b. Bei nasser Ablagerung (Washout) ist die Ablagerungsrate proportional zum Integral der Nuklidkonzentration über die Luftsäule oberhalb des Aufschlagpunktes. Um diesen Sachverhalt zu beschreiben, wird ein neuer Proportionalitätsfaktor, der Washout-Faktor W , als Quotient aus Ablagerungsrate und der während der betrachteten Periode als unverändert vorausgesetzten

Abgaberate \dot{Q} definiert. Im Gegensatz zur trockenen Ablagerung liegt hier der Ort der maximalen Bodenkonzentration im Prinzip am Abgabeort selbst. Man beachte dabei aber die Grundregeln in Kapitel 4 und die weiteren Ausführungen. Analog zu den Festlegungen des Ausbreitungsfaktors werden Kurz- resp. Langzeit-Washout-Faktoren definiert.

Die gesamte orts- und zeitabhängige Ablagerungsrate \dot{A} aus Fallout und Washout ist für jeden Ort als Summe der trockenen und nassen Ablagerungsrate gegeben. Daraus berechnet sich die örtliche Ablagerung A als Zeitintegral über die betrachtete Abgabedauer. Die Methoden zur Berechnung der Washout-Faktoren und der totalen Ablagerungsrate auf Boden und Pflanzen sind in Anhang 2 zusammengestellt.

Für die Berechnung von Abgabelimiten für eine Abgabestelle werden die Ausbreitungsfaktoren χ sowie die Washout-Faktoren W , welche dem Ort mit dem jeweils grössten Gesamtdosisbeitrag in der Umgebung einer Kernanlage entsprechen, verwendet. Landwirtschaftlich nicht für die Nahrungsmittelproduktion nutzbare und unbewohnbare Gebiete (d. h. zum Beispiel Waldflächen) werden ausgeschieden, sofern der Hauptdosisbeitrag nicht von der Direktstrahlung aus der radioaktiven Wolke (Fahne) herrührt.

5.3 Eindringen in den Boden

Nach der Ablagerung auf dem Boden können die Radionuklide in den Boden eindringen, an Bodenpartikel gebunden oder wegtransportiert werden. Durch solche Effekte wird einerseits die externe Direktstrahlung vom Boden reduziert, andererseits gelangen die Nuklide in den Bereich des Bodens (Wurzelbereich), aus dem sie über die Wurzeln in Pflanzen aufgenommen werden und in die Nahrungskette des Menschen gelangen können. Eine genaue Beschreibung des Nuklidtransportes im Boden hängt von vielen Faktoren (z. B. Bodenbeschaffenheit und Bewuchs, Grundwasserspiegel etc.) ab und ist daher komplex. In dieser Richtlinie werden sehr stark vereinfachte Modelle zur Beschreibung der Transportphänomene im Bodenbereich verwendet.

5.4 Transport mit dem Wasser

Für wässrige Abgaben, die in einen Fluss abgeleitet werden, wird eine vollständige Durchmischung des Abwassers mit dem Flusswasser angenommen und vorausgesetzt. Demzufolge wird die gesamte abgegebene Nuklidmenge mit dem Flusswasser mittransportiert.

6 Expositionspfade

Die im Folgenden dargelegten Expositionspfade sind in der Figur 1 dargestellt.

6.1 Luftgetragene Emissionen

6.1.1 Externe Strahlung aus der Fahne

Für die Gesamtdosis aus der externen Strahlung aus der Fahne werden die Beiträge von Edelgasen, Aerosolen sowie Iod berücksichtigt. Die externe Strahlenexposition einer Person aus einer Fahne wird mit Hilfe eines Immersionsmodells mit einer Korrektur für die Aktivitätsverteilung in der Wolke berechnet. Anstelle dieses Immersionsmodells kann auch direkt ein Submersionsmodell angewendet werden.

Als Immersion wird die Berechnung der Strahlenexposition aus der Fahne bezeichnet, wenn angenommen wird, dass die bodennahe Aktivitätskonzentration am betrachteten Aufpunkt homogen über den ganzen Halbraum verteilt ist. Als Submersion wird sie bezeichnet, wenn die tatsächliche Konzentrationsverteilung in der Fahne berücksichtigt wird. Submersionsrechnungen sind aufwändiger, liefern aber vor allem im Bereich, der näher zur Kernanlage liegt als der Hauptaufschlagpunkt, im Allgemeinen realistischere Resultate als Immersionsrechnungen.

Die Abschätzung der Dosis durch die Strahlenexposition aus der Fahne aufgrund eines unkorrigierten Immersionsmodelles führt für Gamma-Strahler am Ort maximaler Konzentration in der bodennahen Luft zu einer Überschätzung der tatsächlichen Dosis um ca. einen Faktor 2.

6.1.3 Bodenstrahlung

Radioaktive Stoffe wie z. B. Iod und Aerosole werden auf dem Boden durch Fallout und Washout abgelagert und tragen somit zur Gesamtdosis durch externe Strahlung bei. Im Gegensatz zu externer Strahlung aus der Abluffahne und zur Inhalation ist die externe Strahlung vom Boden her auch nach dem Fahndurchzug zum Teil über Jahre hinaus zu beachten. Die Dosisberechnung für externe Strahlung vom Boden berücksichtigt die Abschwächung der Strahlung infolge des Eindringens der Aktivität in den Boden sowie den radioaktiven Zerfall (Anhänge 2 und A5.3).

6.1.4 Inhalation wieder aufgewirbelter radioaktiver Stoffe

Nach der Ablagerung auf dem Boden können Iod und Aerosole wieder aufgewirbelt werden, was eine weitere Inhalation ermöglicht. Dieser Effekt kann bei Störfallrechnungen vor allem für α -Aerosole zu nicht vernachlässigbaren Dosen führen (vgl. A5.2).

6.1.5 Ingestion

Ebenso wie die Bodenstrahlung ist auch die Ingestion, d. h. die Aufnahme von Radionukliden mit der Nahrung, ein Langzeiteffekt. Bei der Ingestion werden drei Teilpfade unterschieden, nämlich Aufnahme über pflanzliche Produkte (Gemüse und Obst), Milch und Fleisch. Aerosole, Iod, ^{14}C und in geringerer Masse ^3H können einen signifikanten Beitrag zur Ingestionsdosis liefern, indem sie entweder aus der Luft auf die Blätter (Iod, Aerosole) abgelagert werden oder in den Wurzelbereich (Aerosole) von Pflanzen gelangen oder insbesondere im Falle von ^{14}C in der Form von CO_2 direkt in die Pflanzen eingebaut werden können (Photosynthese). Die zur Berechnung der Ingestionsdosis notwendigen Formeln sowie deren Herleitung sind in den Anhängen 3, 4, sowie A5.4 (für Iod und Aerosole), A5.5 (^{14}C) und A5.6 (^3H) zusammengestellt.

6.2 Ableitungen mit dem Wasser

Nuklidabgaben an Fließgewässer spielen in der Nahrungskette des Menschen über den direkten Trinkwasserkonsum, über den Verzehr von Milch und Fleisch von Tieren, die mit Flusswasser getränkt wurden, und über den Fischverzehr eine Rolle. In allen Fällen wird davon ausgegangen, dass die Ableitungen bei der Wasserfassungsstelle für die Wasserversorgung resp. im Hauptlebensraum der verzehrten Fische vollständig mit dem Wasser des Flusses durchmischt sind resp. bei diskontinuierlichen Ableitungen eine statistische Mittelung der Nuklidkonzentration im Wasser des Flusses über das Jahr möglich ist. Unter dieser Voraussetzung kann die Ingestionsdosis aus dem Konsum von Wasser, Milch, Fleisch und aus

dem Fischverzehr gemäss den Formeln in A5.8 für ^3H und A5.7 für die übrigen Nuklide bestimmt werden.

6.3 Spezialfälle

Neben den in den Kapiteln 6.1 und 6.2 genannten Expositionspfaden sind noch weitere Pfade denkbar, so zum Beispiel die externe Strahlenexposition bei Aufenthalt auf Ufersedimenten und in Schwemmgebieten, die Ingestionsdosis durch das Ausbringen von Fluss-Sedimenten auf Äcker resp. die Bewässerung von Pflanzgebieten mit Wasser aus dem Fluss unterhalb einer Kernanlage etc. Solche Pfade erbringen nur in Spezialfällen einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Gesamtdosis und brauchen somit in den meisten Fällen nicht berücksichtigt werden. In seltenen Ausnahmesituationen muss im Einzelnen abgeklärt werden, ob spezielle Pfade berücksichtigt werden müssen oder ob die Abgabe von Einzelnukliden in einer Form (z. B. organisches ^{14}C) erfolgt, die eine Anpassung oder Erweiterung der in dieser Richtlinie beschriebenen Methoden erfordert.

7 Liste der Verweisungen

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung, Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen (AVV), Bundesanzeiger 42 (64a), 1990

IAEA Safety Series No. 50-SG-S3, Atmospheric Dispersion in Nuclear Plant Siting, 1980

IAEA Safety Standard NS-G-3.2, Dispersion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, 2002

IAEA Safety Report Series, No. 19, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, 2001

Neufassung des Kapitels 4 „Berechnung der Strahlenexposition“ der Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäss § 28 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung, Bundesanzeiger 46 (222a), 29. Juni 1994

Diese Richtlinie wurde am 21. Dezember 2009 vom ENSI verabschiedet.

Der Direktor des ENSI: sig. U. Schmocker

Anhang 1: Ausbreitung, Ablagerung und Transfer radioaktiver Stoffe

Die folgenden Abschnitte enthalten nur die zur Berechnung verwendeten Formeln. Eine Zusammenstellung der darin verwendeten Parameter ist in den Tabellen in Anhang 6 zu finden.

A.1.1 Kurzzeitberechnungen

A.1.1.1 Kurzeitenausbreitungsfaktoren χ_K resp. $\chi_{K,S}$

Kurzeitenausbreitungsfaktor am Boden (Inhalation und Fallout)

Gemäss IAEA Safety Series No. 50-SG-S3¹ ergibt sich für Freisetzung über den Abluftkamin der Kurzeitenausbreitungsfaktor am Boden gemäss der folgenden Formel:

$$\chi_K(X, Y, H_{\text{eff, topo}}) = (1 - G_t) \cdot \frac{e^{-\left(\frac{H_{\text{eff, topo}}^2}{2 \cdot \sigma_z^2} + \frac{Y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right)}}{\pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_y \cdot U(H_a)} + G_t \cdot \frac{e^{-\left(\frac{Y^2}{2 \cdot \sigma_{y,0}^2}\right)}}{\pi \cdot \sigma_{z,0} \cdot \sigma_{y,0} \cdot U(0)}$$

Für andere Freisetzungspfade und generell für Auslegungsfälle soll quelltermabhängig eine konservative effektive Freisetzungshöhe H_{eff} angesetzt und $G_t = 0$ gesetzt werden.

Näherung des Kurzeitenausbreitungsfaktors für Submersion mit einem Kugelmodell (korrigierte Immersionsrechnung)

Um der Aktivitätsverteilung in der Fahne Rechnung zu tragen, müsste für die Berechnung der externen Strahlung über die Fahne aufintegriert werden (Submersionsrechnung). Hier wird stattdessen ein Kugelwolkenmodell gemäss Jones & Charles (1982)² angesetzt. Es wird angenommen, dass die externe Strahlung aus einer Kugel auf der Fahnenachse mit Radius σ herrührt. Die Aktivitätskonzentration im Innern der Kugel wird homogen der Konzentration auf der Fahnenachse gleichgesetzt.

Der Kurzeitenausbreitungsfaktor $\chi_{K,C}$ im Zentrum einer Fahne (d. h. $Y=0$) ist durch die folgenden Formeln gegeben:

¹ IAEA Safety Series No. 50-SG-S3, Atmospheric Dispersion in Nuclear Plant Siting, 1980 (Hinweis: Dieses Dokument ist IAEA-seitig nicht mehr gültig.)

² Jones, J.A., Charles, D., AD-MARC – The atmospheric dispersion module in the methodology for assessing the radiological consequences of accidental releases, NRPB-M72, 1982

Höhenanteil der Fahne:

$$\chi_{K,C}(X, H_{\text{eff,topo}}) = \frac{1 + e^{-\left(\frac{2 \cdot H_{\text{eff,topo}}^2}{\sigma_z^2}\right)}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot U(H_a)}$$

Bodenanteil der Fahne:

$$\chi_{K,C}(X, 0) = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_{y,0} \cdot \sigma_{z,0} \cdot U(0)}$$

Dieser Kurzzeitausbreitungsfaktor $\chi_{K,C}$ im Zentrum der Fahne muss dann mit Hilfe eines geeigneten Korrekturfaktors k_{sc}^c auf einen speziellen "Submersions"-Kurzzeitausbreitungsfaktor $\chi_{K,S}$ umgerechnet werden. Es gilt:

$$\chi_{K,S}(X, Y, H_{\text{eff,topo}}) = (1-G_t) \cdot k_{sc}^c(X, Y, H_{\text{eff,topo}}) \cdot \chi_{K,C}(X, H_{\text{eff,topo}}) + G_t \cdot k_{sc}^c(X, Y, 0) \cdot \chi_{K,C}(X, 0)$$

Für k_{sc}^c ergibt sich das folgende Interpolationspolynom:

$$k_{sc}^c = \exp\left[\sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^i a_{i,j} \cdot \left(\frac{r}{\sigma}\right)^{(i-j)} \cdot \{\ln(\sigma)\}^j\right]$$

mit

$$\sigma = \sqrt{\sigma_z \cdot \sigma_y}$$

Dabei sollen die folgenden Randbedingungen beachtet werden:

- Wenn $\sigma > 1000$, so wird σ für die Rechnung mit 1000 eingesetzt.
- Wenn $r/\sigma > 5$, so wird σ so erhöht, dass der Quotient $r/\sigma = 5$ gilt. Bei den χ_c wird das Produkt $\sigma_y \cdot \sigma_z$ unter dem Bruchstrich ebenfalls durch das angepasste σ^2 ersetzt.
- Wenn $r = 0$, so wird mit dem Quotienten $r/\sigma = 0,0001$ gerechnet.

Bezeichnungen

A-F *Bezeichnung für die 6 Wetterkategorien: die Bestimmung, welcher Wetterkategorie eine Situation zuzuordnen ist, erfolgt gemäss IAEA Safety Series No. 50-SG-S3, Tab. VII (Windgeschwindigkeits-Temperaturgradienten-Methode)*

$a_{i,j}$ *Koeffizienten für das (zweidimensionale) Interpolationspolynom zur Bestimmung des Korrekturfaktors k_{sc}^c . Es sind die folgenden Werte zu verwenden:*

$a_{i,j}$ j	0	1	2	3	4	5
0	$-2.697 \cdot 10^{+0}$					
1	$1.125 \cdot 10^{+0}$	$-3.429 \cdot 10^{+0}$				
2	$-2.248 \cdot 10^{-1}$	$-1.569 \cdot 10^{+0}$	$2.830 \cdot 10^{+0}$			
3	$-1.920 \cdot 10^{-1}$	$3.298 \cdot 10^{-1}$	$6.236 \cdot 10^{-1}$	$-7.745 \cdot 10^{-1}$		
4	$7.361 \cdot 10^{-2}$	$-2.903 \cdot 10^{-2}$	$-7.889 \cdot 10^{-2}$	$-1.018 \cdot 10^{-1}$	$9.420 \cdot 10^{-2}$	
5	$-7.276 \cdot 10^{-3}$	$2.033 \cdot 10^{-3}$	$2.138 \cdot 10^{-3}$	$4.581 \cdot 10^{-3}$	$5.880 \cdot 10^{-3}$	$-4.305 \cdot 10^{-3}$

- G_t Anteil der Abgabe, der aufgrund von Gebäudeeinflüssen als Bodenabgabe angenommen wird (vgl. IAEA Safety Series No. 50-SG-S3, Kapitel 3.5.3)
- H_{eff} nicht topographiekorrigierte effektive Abgabehöhe gemäss den Formeln in IAEA Safety Series No. 50-SG-S3, Kapitel 3.5.2
In den Formeln der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung³ ist die dort verwendete Bezeichnung H jeweils durch H_{eff} zu ersetzen.
- H_a tatsächliche Abgabehöhe ohne jegliche Korrektur
- $H_{eff,topo}$ topografiekorrigierte, effektive Fahnenhöhe
Die Topografiekorrektur erfolgt gemäss der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung, wobei aber hier für die topografische Korrektur der Wert $h(X,Y)$ und nicht $h(X,0)$ verwendet wird.
- $h(X,Y)$ Höhe des Geländes bezogen auf den Fusspunkt des Emissionsortes [m]:
 $h(X,Y) = h_i(X,Y) - h_i(0,0)$
- $h_i(X,Y)$ topographische Höhe eines Punktes im Gelände (m.ü.M)
- ΔH Differenzhöhe zwischen Aufpunkt für die korrigierte Immersionsrechnung und der Fahnenachse
Es gilt $\Delta H = H_{eff,topo}(X, Y=0) + [h_i(X,0) - h_i(X,Y)]$.
- r absolute Distanz zwischen betrachtetem Ort und der Fahnenachse
 $r = \sqrt{\Delta H^2 + Y^2}$
- $U(H_a)$ Windgeschwindigkeit in m/s in unkorrigierter Abgabehöhe (z. B. Kaminhöhe)
- $U(0)$ Für die Berechnung von Abgabelimiten und bei Auslegungsfällen wird bei Kurzzeitabgaben ein höhenunabhängiges Windgeschwindigkeitsfeld angenommen. Die Windgeschwindigkeiten $U(H_a) = U(0)$ werden dann in 1 m/s-Schritten von 1 bis 10 m/s variiert und der maximale Ausbreitungsfaktor bestimmt.

³ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung, Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen (AVV), Bundesanzeiger 42 (64a), 1990

In den übrigen Fällen (Bestimmung des Langzeitausbreitungsfaktors, vgl. unten, resp. Berechnung eines Kurzzeitausbreitungsfaktors mit gemessenen Windgeschwindigkeiten) ist die Windgeschwindigkeit wie folgt zu korrigieren:

$$\text{für } H_a > 10\text{m:} \quad U(H_a) = U_M \cdot (H_a/z_1)^{m_k};$$

$$\text{für } H_a < 10\text{m:} \quad U(H_a) = U(0) = U_M \cdot (10/z_1)^{m_k}.$$

U_M ist dabei die in der Messhöhe bestimmte Windgeschwindigkeit, z_1 ist die Messhöhe und H_a die Kaminhöhe. Für die Korrektorexponenten m_k sind für die verschiedenen Wetterkategorien folgende Werte nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung zu verwenden:

Wetterkategorie	A	B	C	D	E	F
m_k	0.09	0.20	0.22	0.28	0.37	0.42

Y Abweichung von der Achse der Ausbreitungsrichtung

Dieser Wert kann 0 gesetzt werden, wenn das maximale χ_k berechnet werden soll (z. B. im Fall der Abgabelimitierungen).

X Distanz zum Abgabeort

Distanzen kleiner als 200 m zum Abgabeort werden nicht berücksichtigt.

x, y globale Koordinaten eines Punktes X, Y . Es gilt:

$$x = x_0 + \cos(\pi/2 - \alpha) \cdot X - \sin(\pi/2 - \alpha) \cdot Y$$

$$y = y_0 + \sin(\pi/2 - \alpha) \cdot X + \cos(\pi/2 - \alpha) \cdot Y$$

x_0, y_0 globale Koordinaten des Abgabeortes

α Ausbreitungsrichtung der Fahne im Gelände in Radianten (N-E-S-W)

σ_y, σ_z Gauss'sche Ausbreitungsparameter

Die Faktoren sind über die folgende Formel mit der Distanz X zum Abgabeort verknüpft.

$$\sigma_i(X) = p_i \cdot (X/X_0)^{q_i}; \quad i = y, z; X_0 = 1 \text{ m}$$

p_i [m] und q_i [dimensionslos] sind sogenannte Vogt'sche Parameter. Deren Werte und allfällige Interpolationen für die Abgabehöhen (effektive Abgabehöhe in 200 m Entfernung zum Abgabeort) sind für die verschiedenen Wetterkategorien (A-F) der Tabelle 1 des Anhangs 7 aus der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung zu entnehmen.

$\sigma_{y,0}, \sigma_{z,0}$ Gauss'sche Ausbreitungsparameter für Boden-Abgabe; für deren Berechnung sind in der obigen Formel die Vogt'schen Parameter für eine Höhe von 50 m zu verwenden.

Kurzzeitausbreitungsfaktoren der schweizerischen Kernanlagen im Normalbetrieb

Für die Kernkraftwerke sind bei Kurzzeitabgaben für die Berechnung von Abgabegrenzen die Kurzzeitausbreitungsfaktoren gemäss den folgenden Tabellen zu verwenden:

Rein trockene Ablagerung:

Kernkraftwerk	$\chi_{K,alt}$ [s/m ³]	χ_K [s/m ³]	$\chi_{K,s}$ [s/m ³]	Hauptaufschlagpunkt, Abwinddistanz, Ausbreitungssektor
KKB I/II	$7.5 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$4.9 \cdot 10^{-5}$	500 m; 250°/255° (Böttstein)
KKG	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	1700 m; 35° (Wohnhäuser Bösch)
KKL	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$9.4 \cdot 10^{-6}$	2250 m; 205° (Brühalden)
KKM	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	1600 m; 160°-170° (WNW Stockeren)

Gleichzeitige trockene und nasse Ablagerung mit Berücksichtigung der Annahme einer Abgabedauer von mindestens 24 Stunden:

Kernkraftwerk	$\chi_{K,alt}$ [s/m ³]	χ_K [s/m ³]	$\chi_{K,s}$ [s/m ³]	Hauptaufschlagpunkt, Abwinddistanz, Ausbreitungssektor
KKB I/II	$1.9 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	500 m; 250°/255° (Böttstein)
KKG	$7.0 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	400 m; 320° (Stegbach)
KKL	$9.0 \cdot 10^{-6}$	0	$1.1 \cdot 10^{-7}$	400 m; 225° (Wermet)
KKM	$5.0 \cdot 10^{-6}$	0	$4.0 \cdot 10^{-7}$	250 m; 355° (Brättelen)

Die Ausbreitungsfaktoren der übrigen Kernanlagen im Aufsichtsbereich des ENSI sind in anderen Dokumenten (z. B. im betreffenden Abgabereglement) angegeben.

A.1.2 Langzeitberechnungen

A.1.2.1 Langzeitausbreitungsfaktoren χ_L resp. $\chi_{L,S}$

Der Langzeitausbreitungsfaktor χ_L resp. der Submersions-Langzeitausbreitungsfaktor $\chi_{L,S}$ wird durch Mittelung unter Zugrundelegung einer meteorologischen Langzeitstatistik aus den Kurzzeitausbreitungsfaktoren $\chi_{K(S)}$ ermittelt:

$$\chi_{L(S)}(x,y) = \sum_{i,j,k} P_{ijk} \cdot \chi_K(Y(x,y,i), H_{eff,corr}(x,y,j,k), X(x,y,i), j,k)$$

Dieser Formel liegt eine Diskretisierung der Meteorstatistik in Ausbreitungssektoren und diskrete Windgeschwindigkeitsintervalle zugrunde.

Bezeichnungen

P_{ijk} Wahrscheinlichkeit für eine Wettersituation mit Ausbreitungsrichtung in Sektor i , Windgeschwindigkeit im Intervall j und Wetterkategorie k

$P_{ijk} = T_{ijk} / T_{tot}$, wobei T_{tot} die Gesamtzeit ist, über die die Wetterstatistik erhoben wurde, T_{ijk} die Zeit, für die die Wetterbedingungen i, j, k zutrafen.

i Laufzahl über die Sektoren

Das ENSI verwendet für die Diskretisierung $n=72$ Sektoren, wobei Sektor 1 einer Ausbreitung Richtung Nord, 19 Richtung Ost etc. entspricht. Da übliche Meteorstatistiken normalerweise eine andere Sektorenzahl m ($i'=1..m$) benützen, muss folgende Umrechnung vorgenommen werden.

Sofern ein Sektor i vollständig in einen Sektor i' fällt, so gilt

$$P_{ijk} = P_{i'jk} \cdot m/n;$$

fällt ein Sektor i hingegen in mehrere Sektoren $i_1..i_h$, erhält man die Wahrscheinlichkeit als $P_{ijk} = m/n \cdot \sum_{l=1}^h f_l \cdot P_{i_l'jk}$, wobei f_l den Anteil des Sektors i beschreibt, der in den Sektor i_l' fällt.

Zum Beispiel fällt der Sektor $i=4$ der 72-Sektoren-Diskretisierung des ENSI je zur Hälfte in die Sektoren $i'=1$ und $i'=2$ einer 12-Sektoren-Wetterstatistik.

Im übrigen wird angenommen, dass der Wind nur zentral in den jeweiligen Sektor i weht.

j Laufzahl über die Windgeschwindigkeiten

Zum Beispiel können hier 11 diskrete Windgeschwindigkeiten von 0,5 bis 10,5 m/s in der jeweiligen Messhöhe angenommen werden. Es können aber auch andere Abstufungen verwendet werden, wobei darauf zu achten ist, dass die Einteilungsintervalle bei kleinen Windgeschwindigkeiten genügend fein sind.

k Laufzahl über die Wetterkategorien (A-F).

A.1.2.2 Langzeitausbreitungsfaktoren der schweizerischen Kernanlagen im Normalbetrieb

Für die Kernkraftwerke werden bei Langzeitabgaben für sämtliche Ausbreitungsrechnungen die Langzeitausbreitungsfaktoren gemäss der folgenden Tabelle verwendet:

Kernkraftwerk	χ_L [s/m ³]	$\chi_{L,s}$ [s/m ³]
KKB I/II	$5.0 \cdot 10^{-6}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$
KKG	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$
KKL	$9.2 \cdot 10^{-7}$	$9.2 \cdot 10^{-7}$
KKM	$6.0 \cdot 10^{-7}$	$6.0 \cdot 10^{-7}$

Anhang 2: Ablagerungsfaktoren für Boden und Pflanzenoberfläche

A.2.1 Fallout- bzw. Washout-Faktoren

Fallout

Die Ablagerungsrate \dot{A}_F durch Fallout (trockene Ablagerung auf dem Boden) ist über die Ablagerungsgeschwindigkeit v_g direkt mit der örtlichen Nuklidkonzentration C_L verknüpft (vgl. Kap. 5.2). Es gilt somit ($C_L = \dot{Q} \cdot \chi$) für die Fallout-Ablagerungsrate:

$$\dot{A}_F = C_L \cdot v_g = \dot{Q} \cdot \chi \cdot v_g = \dot{Q} \cdot F$$

Der Faktor $F_L = \chi_L \cdot v_g$ resp. $F_K = \chi_K \cdot v_g$ wird als Langzeit- resp. Kurzzeit-Falloutfaktor bezeichnet.

Washout

Washout-Faktoren W definieren direkt die Proportionalität zwischen der Abgaberate \dot{Q} und der Ablagerungsrate \dot{A}_W durch Washout:

$$\dot{A}_W = \dot{Q} \cdot W$$

Die Herleitung der Washout-Faktoren geschieht auf ähnliche Weise wie die der Kurz- und Langzeitausbreitungsfaktoren.

A.2.2 Kurzzeitfaktoren

A.2.2.1 Kurzzeit-Washout-Faktor WK

Herleitung

Die Herleitung basiert auf der Annahme, dass der Kurzzeit-Washout-Faktor proportional zu der Gesamtaktivität in der Luftsäule über dem Ort am Boden ist. Der Proportionalitätsfaktor ist dabei der Washout-Koeffizient Λ , der von der Niederschlagsintensität I_N und der Nuklidgruppe (Aerosole, Iod oder tritiiertes Wasser) abhängt.

Endformel gemäss IAEA Safety Series No. 50-SG-S3 und der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung

$$W_K(X,Y) = (1-G_t) \cdot \frac{\Lambda \cdot \exp\left[-\left(\frac{Y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right)\right]}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot U(H_a) \cdot \sigma_y} + G_t \cdot \frac{\Lambda \cdot \exp\left[-\left(\frac{Y^2}{2 \cdot \sigma_{y,0}^2}\right)\right]}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot U(0) \cdot \sigma_{y,0}}$$

Bezeichnungen

Λ Washout-Koeffizient: Es gilt $\Lambda = \Lambda_0 \cdot (I_N/I_0)^\kappa$, mit einer Niederschlagsintensität I_N , einer Referenzniederschlagsintensität I_0 (1 mm/h) und κ einem Korrektorexponenten. Λ_0 bezeichnet den Referenz-Washout-Koeffizienten für eine Niederschlagsintensität von 1 mm/h.

... Die Bedeutung der übrigen Parameter wurde bereits im Kapitel A1.1.1 angegeben.

Für die Berechnung von Abgabelimiten ist der so bestimmte Washout-Faktor W_K zur Berücksichtigung einer Abgabedauer von mind. 24 Stunden durch 4 zu dividieren.

A.2.3 Langzeitfaktoren

A.2.3.1 Langzeit-Washout-Faktor W_L

Herleitung

Analog zum Langzeitausbreitungsfaktor ergibt sich der Langzeit-Washout-Faktor W_L durch eine statistische Mittelung über die Kurzzeit-Washout-Faktoren W_K .

Endformel

$$W_L(x,y) = \sum_{i,j,k,m} P_{ijkm} \cdot W_K(\Lambda(m), Y(x,y,i), X(x,y,i), j, k)$$

Bezeichnungen

P_{ijkm} Wahrscheinlichkeit für eine Wettersituation mit Ausbreitungsrichtung in Sektor i , Windgeschwindigkeit im Intervall j , Wetterkategorie k und Niederschlagsintensität im Intervall m .

$P_{ijkm} = T_{ijkm}/T_{tot}$, wobei T_{tot} die Gesamtzeit ist, über die die Wetterstatistik erhoben wurde, T_{ijkm} die Zeit, für die die Wetterbedingungen i,j,k,m zutrafen.

m Laufzahl über die Niederschlagsintensitäten

A.2.3.2 Totale Ablagerungsfaktoren

Definition

Zur Berechnung der totalen Ablagerungsrate auf den Boden und auf die Pflanzenoberfläche werden jeweils totale Kurzzeit- oder Langzeit-Ablagerungsfaktoren ξ_L , ξ_K , ξ'_L resp. ξ'_K definiert. Es gilt:

$$\xi = F + W \text{ (Ablagerung direkt auf den Boden)}$$

und mit einem Pflanzenoberflächen-Depositionsfaktor f_d :

$$\xi' = F + f_d \cdot W \text{ (Ablagerung auf Pflanzenoberflächen)}$$

Gemäss den Definitionen der Fallout- und Washout-Faktoren gilt für die Totalablagerungsrate \dot{A} :

$$\dot{A} = \dot{A}_F \quad \dot{A}_W = \xi \cdot \dot{Q} \text{ (Boden)}$$

resp.

$$\dot{A} = \dot{A}_F \cdot f_d \cdot \dot{A}_W = \xi' \cdot \dot{Q} \text{ (Pflanzenoberfläche)}$$

Kommentare

Für die Berechnung der ungünstigsten Totalablagerungsrate \dot{A} muss auch der jeweils ungünstigste totale Ablagerungsfaktor ξ resp. ξ' bestimmt werden. Dies geschieht gemäss den Festlegungen im Kapitel 6.2.

Der Faktor f_d berücksichtigt, dass nur ein Bruchteil der feucht abgelagerten Stoffe auf Pflanzenoberflächen abgelagert wird oder nach der Ablagerung dort verbleibt.

Ablagerungsfaktoren der Schweizerischen Kernkraftwerke

Bis auf weiteres werden für sämtliche Ausbreitungsrechnungen bei Langzeitabgaben und für die Berechnung von Abgabelimiten bei Kurzzeitabgaben die Lang- resp. Kurzzeit-Falloutfaktoren (F_L, F_K) und die Washout-Faktoren (W_L, W_K) gemäss den folgenden Tabellen verwendet:

Langzeitausbreitung

Kernkraftwerk	Iod		Aerosole		Tritium
	F_L [m ⁻²]	W_L [m ⁻²]	F_L [m ⁻²]	W_L [m ⁻²]	W_L [m ⁻²]
KKB I/II	0	$8.5 \cdot 10^{-8}$	0	$8.5 \cdot 10^{-8}$	0
KKG	0	$2.0 \cdot 10^{-8}$	0	$2.0 \cdot 10^{-8}$	0
KKL	0	$1.7 \cdot 10^{-8}$	0	$1.7 \cdot 10^{-8}$	0
KKM	0	$1.0 \cdot 10^{-8}$	0	$1.0 \cdot 10^{-8}$	0

Kurzzeitausbreitung

Rein trockene Ablagerung

Kernkraftwerk	Iod (elementar)		Aerosole		Hauptaufschlagpunkt (Abwinddistanz, Ausbreitungssektor)
	F_K [m ⁻²]	W_K [m ⁻²]	F_K [m ⁻²]	W_K [m ⁻²]	
KKB I/II	$1.6 \cdot 10^{-6}$	-	$2.4 \cdot 10^{-7}$	-	500 m; 250°/255° (Böttstein)
KKG	$2.0 \cdot 10^{-7}$	-	$3.0 \cdot 10^{-8}$	-	1700 m; 35° (Bösch)
KKL	$1.5 \cdot 10^{-7}$	-	$2.3 \cdot 10^{-8}$	-	2250 m; 205° (Brühalden)
KKM	$2.7 \cdot 10^{-7}$	-	$4.1 \cdot 10^{-8}$	-	1600 m; 160°-170° (Stockeren)

Gleichzeitig trockene und nasse Ablagerung mit Berücksichtigung der Annahme einer Abgabedauer von mindestens 24 Stunden. Die Washout-Faktoren sind für eine Niederschlagsintensität von 2 mm/h angegeben.

Kernkraftwerk	Iod		Aerosole		Hauptaufschlagpunkt (Abwinddistanz, Ausbreitungssektor)
	F_K [m ⁻²]	W_K [m ⁻²]	F_K [m ⁻²]	W_K [m ⁻²]	
KKB I/II	$4.0 \cdot 10^{-7}$	$9.3 \cdot 10^{-8}$	$6.0 \cdot 10^{-8}$	$9.3 \cdot 10^{-8}$	500 m; 250°/255° (Böttstein)
KKG	~ 0	$2.3 \cdot 10^{-7}$	~ 0	$2.3 \cdot 10^{-7}$	400 m; 320° (Stegbach)
KKL	0	$2.5 \cdot 10^{-7}$	0	$2.5 \cdot 10^{-7}$	400 m; 225° (Wermet)
KKM	0	$4.0 \cdot 10^{-7}$	0	$4.0 \cdot 10^{-7}$	250 m; ~355° (Brättelen)

Anhang 3: Nuklidaktivität auf dem und im Boden

Das Modell der ENSI-Richtlinie G14 behandelt das Eindringen der Radioaktivität in den Boden für die Berechnung der externen Strahlung und den Transfer über die Wurzeln unterschiedlich.

A.3.1 Annahmen

- Für die externe Strahlung durch Ablagerungen wird eine Abschirmung durch das Eindringen in den Boden berücksichtigt. Dabei werden alle Gammastrahler nach dem gleichen Modell von Till & Meyer (1983)⁴ behandelt.
- Der Transfer über die Wurzeln setzt erst im Folgejahr nach der Ablagerung ein. Dabei wird angenommen, dass die abgelagerte Aktivität z. B. durch Pflügen homogen mit dem Erdreich im Wurzelbereich vermischt wird. Nach der Durchmischung kann die Aktivität dann mit der Verweilkonstanten λ_W in tiefere, für die Wurzeln nicht mehr erreichbare Schichten gelangen [vgl. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung].
- Die Zeit t beschreibt für Langzeitabgaben die Dauer seit dem Beginn des interessierenden Kalenderjahres, für Kurzzeitabgaben die Dauer seit der Abgabe.

A.3.2 Kurzzeitabgaben

Wirksame Bodenaktivität für externe Strahlung

Bei einer Kurzzeitabgabe wird der Einfluss der Vorjahre nicht betrachtet und es wird angenommen, dass die Abgabedauer so kurz ist, dass Zerfalls- und Eindringeffekte während der Abgabe vernachlässigbar sind. Damit ergibt sich für die bei Kurzzeitabgaben für die externe Strahlung wirksame Ablagerung:

$$A(t) \cong \{Q \cdot \xi_K\} \cdot [0.63 \cdot e^{-(\lambda + \lambda_{\text{fast}})t} + 0.37 \cdot e^{-(\lambda + \lambda_{\text{slow}})t}]$$

D. h. $A(t)$ ist von der Gesamtabgabe Q abhängig.

Nuklidkonzentration im Wurzelbereich von Pflanzen

Bis zur Durchmischung, welche während des ersten Winterhalbjahres nach dem Abgabezeitpunkt und vor dem Beginn des Pflanzenwachstums für die nächste Ernteperiode angenommen wird, kann die Bodenkonzentration im Wurzelbereich von Pflanzen als 0 angenommen werden.

⁴ Till, J.E, Meyer, H.R., Radiological Assessment, a Textbook on Environmental Dose Analysis, NUREG/CR-3332 (ORNL-5968), 1983

Ab diesem Zeitpunkt errechnet sich die Bodenkonzentration $C_{Bo}(t)$ nach der Formel

$$C_{Bo}(t) = Q \cdot \xi_K / P_{Pfl} \cdot e^{-\lambda \cdot T_K} \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} \cdot (t - T_K)} \cong Q \cdot \xi_K / P_{Pfl} \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} \cdot t}$$

mit der Zeit T_K zwischen dem Abgabezeitpunkt und der Durchmischung des Wurzelbereiches, z. B. durch Umpflügen.

Hinweis: Für kurze Zeiträume bis ca. 1 Jahr darf die Zerfallskonstante λ ohne bedeutende Einbusse an Rechengenauigkeit durch $\lambda_{e,Bo}$ ersetzt werden.

A.3.3 Langzeitabgaben

Wirksame Bodenaktivität für externe Strahlung

Es wird konservativ angenommen, dass die Radioaktivität im Kalenderjahr, für das die Dosis berechnet wird, nicht weiter in den Boden eindringt. Die aufgrund der externen Strahlung dosiswirksame Ablagerung $A(t)$ auf dem Boden unter Berücksichtigung der Ablagerungen der Vorjahre wird somit durch die folgende Formel beschrieben:

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda t} + \int_0^t \dot{Q} \cdot \xi_L \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'$$

λ ist die radioaktive Zerfallskonstante. Die Abgaberate \dot{Q} wird bei Langzeitabgaben über das ganze Jahr konstant angenommen. Somit ergibt sich nach Auflösung des Integrals die für die externe Strahlung wirksame Ablagerung:

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda t} + \dot{Q} \cdot \xi_L \cdot (1 - e^{-\lambda t}) / \lambda$$

Der Einfluss der Ablagerungen der Vorjahre zu Beginn des zu betrachtenden Kalenderjahres $A(0)$ kann gemäss Till & Meyer (1983) nach folgender Methode bestimmt werden:

$$A(0) = A_{fast}(0) + A_{slow}(0)$$

Dabei beschreibt $A_{fast}(0)$ einen rasch, $A_{slow}(0)$ einen langsam in den Boden eindringenden und somit abgeschirmten Aktivitätsanteil. Für die Überprüfung der Abgabelimittierung wird von einer Anreicherung im Bodens durch homogenen Abgaben in der Höhe der Abgabelimittierung während 50 Betriebsjahren ausgegangen. In diesem Fall errechnen sich $A_{fast}(0)$ und $A_{slow}(0)$ als:

$$A_{fast}(0) = 0.63 \cdot [\dot{Q} \cdot \xi_L] / (\lambda + \lambda_{fast}) \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_{fast}) \cdot T_{50}})$$

$$A_{slow}(0) = 0.37 \cdot [\dot{Q} \cdot \xi_L] / (\lambda + \lambda_{slow}) \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_{slow}) \cdot T_{50}})$$

Die Eindringkonstanten λ_{fast} und λ_{slow} , die Faktoren 0.63 und 0.37 sowie die ganzen Formeln stammen aus Till & Meyer (1983) und gelten streng genommen nur für ^{137}Cs ; sie werden vom ENSI aber für alle Nuklide angewendet.

Für Berechnungen der Dosis aus gemessenen Jahresabgaben ergeben sich $A_{fast}(0)$ und $A_{slow}(0)$ iterativ über 1-Jahres-Intervalle:

$$A_{\text{fast}}(0) = A_{\text{fast}}(-1) \cdot e^{-(\lambda + \lambda_{\text{fast}}) \cdot T_1} + 0.63 \cdot [\dot{Q}(-1) \cdot \xi_L] / (\lambda + \lambda_{\text{fast}}) \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_{\text{fast}}) \cdot T_1})$$

$$A_{\text{slow}}(0) = A_{\text{slow}}(-1) \cdot e^{-(\lambda + \lambda_{\text{slow}}) \cdot T_1} + 0.37 \cdot [\dot{Q}(-1) \cdot \xi_L] / (\lambda + \lambda_{\text{slow}}) \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_{\text{slow}}) \cdot T_1})$$

$\dot{Q}(-1)$ ist die (homogen angenommene) Abgaberate im Vorjahr und $A_{\text{fast}}(-1)$ und $A_{\text{slow}}(-1)$ sind die jeweiligen Aktivitätsanteile zu Beginn des Vorjahres.

Nuklidkonzentration im Wurzelbereich von Pflanzen

Eine Durchmischung des bepflanzten Bodens, z. B. durch Umpflügen oder natürliches Eindringen, wird jeweils auf Beginn eines Kalenderjahres angenommen. Die im Boden für die Pflanzen verfügbare Nuklidkonzentration klingt anschliessend während des Jahres exponentiell nach der folgenden Formel ab:

$$C_{\text{Bo}}(t) = C_{\text{Bo}}(0) \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} t}$$

Dabei entspricht $C_{\text{Bo}}(0)$ der Konzentration im Boden zu Beginn des Kalenderjahres und $\lambda + \lambda_W = \lambda_{e,\text{Bo}}$ [Jahr⁻¹] der effektiven Verweilkonstante der einzelnen Radionuklide im Wurzelbereich. Die Bodenkonzentration $C_{\text{Bo}}(0)$ im Wurzelbereich von Pflanzen aus den Ablagerungen der Vorjahre errechnet sich nach 50 Betriebsjahren unter der Annahme homogener Abgaben:

$$C_{\text{Bo}}(0) \cong \dot{Q} \cdot \xi_L / [\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot P_{\text{Pfl}}] \cdot (1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_{50}})$$

Für eine Berechnung aus gemessenen Jahresabgaben ergibt sich $C_{\text{Bo}}(0)$ iterativ:

$$C_{\text{Bo}}(0) = C_{\text{Bo}}(-1) \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_1} + \dot{Q}(-1) \cdot \xi_L / [\lambda \cdot P_{\text{Pfl}}] \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot T_1})$$

In diesen Formeln beschreibt P_{Pfl} die Flächenmasse des Erdreiches im Wurzelbereich von Pflanzen [kg/m²]; weiter bedeutet $C_{\text{Bo}}(-1)$ die Konzentration im Boden zu Beginn des Vorjahres und $\dot{Q}(-1)$ die wiederum homogen angenommene Abgaberate zwischen dem Beginn des Vorjahres und dem Beginn des laufenden Kalenderjahres.

Anhang 4: Aktivität auf und in konsumierten resp. verfütterten Pflanzen

A.4.1 Annahmen

- Es wird unterschieden zwischen erntefrischen Pflanzen und Lagerpflanzen.
- Die gesamte Produktion von pflanzlichen Produkten und Futter sowohl für erntefrische Pflanzen wie für Lagerpflanzen erfolgt gleichmässig verteilt über eine Ernteperiode (16. April bis 15. Oktober). Der Beginn der Ernteperiode wird mit T_E bezeichnet.
- Allgemein ergibt sich die totale Nuklidkonzentration in erntefrischen Pflanzen als Summe der Beiträge aus Blattablagerung (I) und Aufnahme über den Wurzelbereich (II).
- Für die Lagerpflanzen wird in einem 1. Schritt die über ein halbes Jahr gemittelte Konzentration am Ende der Ernteperiode berechnet und anschliessend in einem 2. Schritt der Zerfall von diesem Zeitpunkt bis zum Verzehr berücksichtigt.
- Während des Winterhalbjahres (16. Oktober bis 15. April) werden ausschliesslich Lagerpflanzen verzehrt resp. verfüttert. Dabei wird angenommen, dass die Aktivität im Lager zu Beginn des Winterhalbjahres vollständig durchmischt ist.
- Der Parameter t beschreibt die Zeit seit Beginn des Kalenderjahres (Langzeitabgaben) resp. seit der Abgabe (Kurzzeitabgaben).

Bemerkung: Sowohl für Kurzzeit- wie für Langzeitabgaben ist der Index Pfl für die Parameter C_{Pfl} , Y_{Pfl} , P_{Pfl} , T_{Pfl} und TF_{Bo-Pfl} im folgenden sinngemäss für pflanzliche Produkte durch PP, für Futterpflanzen durch FP zu ersetzen.

A.4.2 Herleitung für Kurzzeitabgaben

Bei Kurzzeitabgaben beschreibt der Parameter T_P die Zeitperiode zwischen der Abgabe und dem Ende der nächstfolgenden Ernteperiode.

Sowohl für pflanzliche Frisch- wie Lagerprodukte trägt nach der Abgabe **bis zum Beginn der nächsten Ernteperiode** nur die **direkte Ablagerung auf die Pflanzenoberfläche** zur Nuklidkonzentration in den Pflanzen und somit auch zur Ingestionsdosis bei. Durch diese Ablagerungen werden die Pflanzen höchstens bis zur Wachstumszeit T_{Pfl} nach der Abgabe kontaminiert; wenn die Abgabe gegen Ende der Ernteperiode erfolgt und die Bedingung T_P kleiner als T_{Pfl} gilt, dann spielt sogar nur die Kontamination der Pflanzen während der Zeitperiode T_P eine Rolle. Diesem Umstand wird in den folgenden Formeln durch die Einführung eines Hilfsparameters $T^* = \text{Min}(T_{Pfl}, T_P)$ Rechnung getragen.

Die Konzentration in **erntefrischen** Pflanzen durch Ablagerung auf die Pflanzenoberfläche erreicht zwischen einer Kurzzeitabgabe und dem Zeitpunkt T^* im allgemeinen die folgenden Werte:

- für eine Abgabe während der Ernteperiode ($T_P < 1/2$ Jahr)

$$C_{Pfl,BI}(t) = Q \cdot \xi'_K / Y_{Pfl} \cdot e^{-\lambda_{e,BI} \cdot t}$$

- für eine Abgabe im Winterhalbjahr ($T_P \geq 1/2$ Jahr)

$$C_{Pfl,BI}(t) = 0$$

Für **Lagerprodukte**, die bei Abgaben während der Ernteperiode kontaminiert werden, gilt für die mittlere Nuklidkonzentration $C^0_{Pfl,L}$ am Ende dieser Ernteperiode:

$$C^0_{Pfl,L} = \frac{1}{T_1/2} \cdot \int_0^{T^*} C_{Pfl,BI}(t') \cdot e^{-\lambda \cdot (T_P - t')} dt'$$

Nach Lösung des Integrals und bei Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls nach Abschluss der Ernteperiode bis zum Verzehr ($T_P < t < T_P + 1/2$) erhält man die folgende Nuklidkonzentration in den Lagerpflanzen ($C^0_{Pfl,BI} = Q \cdot \xi'_K / Y_{Pfl}$):

$$C_{Pfl,L}(t) = C^0_{Pfl,L} \cdot e^{-\lambda(t-T_P)} = \left[C^0_{Pfl,BI} \cdot e^{-\lambda \cdot T_P} \cdot \frac{1}{\lambda_V \cdot T_1/2} \right] \cdot e^{-\lambda(t-T_P)}$$

Hinweis: Der durch die Integration entstehende Term $1 - e^{-\lambda_V \cdot T^*}$, welcher in der obigen Formel streng genommen auftreten würde, kann näherungsweise 1 gesetzt werden, sofern $\lambda_V \cdot T^*$ sehr viel grösser als 1 ist.

Kurzzeitabgaben ausserhalb von Ernteperioden liefern über die Blattablagerung im allgemeinen keinen Beitrag zur Nuklidkonzentration in Lagerprodukten. Eine Ausnahme bildet der Fall, wenn der Abgabezeitpunkt direkt vor der Ernteperiode liegt, d. h. die Bedingung $\lambda_V \cdot (T_P - 1/2)$ in der Grössenordnung oder kleiner als 1 erfüllt ist. Dieser Fall wird hier nicht näher betrachtet und diskutiert.

Ab dem **der Abgabe folgenden Beginn einer neuen Ernteperiode** spielt sowohl in pflanzlichen Frisch- wie in Lagerprodukten nur noch der Nuklidtransfer über die Wurzeln eine Rolle. Mit den Transferfaktoren TF_{Bo-Pfl} zwischen Boden und Pflanzen erhält man in diesem Fall die Konzentration in **erntefrischen** Pflanzen aus der Wurzel Aufnahme als:

$$C_{Pfl,W}(t) = Q \cdot \xi_K \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} t} / P_{Pfl} \cdot TF_{Bo-Pfl}$$

Da für Integrationen über Zeiträume von $1/2$ -Jahr und kürzer $\lambda \cong \lambda_{e,Bo}$ gesetzt werden darf, kann gezeigt werden, dass sich die Nuklidkonzentration in **Lagerprodukten** nur unbedeutend von der Nuklidkonzentration in Frischprodukten unterscheidet und somit die gleiche Formel benützt werden darf.

Mit diesen Herleitungen ergibt sich im allgemeinen schliesslich die zeitabhängige Konzentration in verbrauchsbereiten Pflanzen bei Kurzzeitabgaben:

zeitabhängige Konzentration in verbrauchsbereiten Pflanzen bei Kurzzeitabgaben:

für Abgaben in der Ernteperiode ($T_P < T_{1/2}$):

- bis zum Zeitpunkt $T^* = \text{Min}[T_{Pfl}, T_P]$: $C_{Pfl}(t) = C_{Pfl,BI}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,BI} \cdot t}$
- vor Ende der Ernteperiode ($T^* \leq t < T_P$): $C_{Pfl}(t) = 0$
- im 1. Winterhalbjahr ($T_P \leq t < T_P + T_{1/2}$): $C_{Pfl}(t) = C_{Pfl,L}(t) = C_{Pfl,BI}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot t / (\lambda_V \cdot T_{1/2})}$
- ab der 2. Ernteperiode ($t \geq T_P + T_{1/2}$): $C_{Pfl}(t) = C_{Pfl,W}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} \cdot t}$

für Abgaben im Winterhalbjahr ($T_P \geq T_{1/2}$):

- bis zum Beginn der Ernteperiode ($t \leq T_P - T_{1/2}$): $C_{Pfl}(t) = 0$
- ab Beginn der Ernteperiode ($t > T_P - T_{1/2}$): $C_{Pfl}(t) = C_{Pfl,W}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} \cdot t}$

mit $C_{Pfl,BI}^0 = Q \cdot \xi'_K / Y_{Pfl}$

$$C_{Pfl,W}^0 = Q \cdot \xi'_K \cdot TF_{Bo-Pfl} / P_{Pfl}$$

A.4.3 Herleitung für Langzeitabgaben

Die Konzentration durch **Ablagerung auf der Pflanzenoberfläche** ist gemäss den Definitionen in Anhang A1.2.3 gegeben als Integral über die Pflanzenwachstumszeit T_{Pfl} :

$$C_{Pfl,BI}^0 = \int_0^{T_{Pfl}} \dot{Q} \cdot \xi'_L / Y_{Pfl} \cdot e^{-\lambda_{e,BI} \cdot t} \cdot dt$$

Darin bezeichnet Y_{Pfl} das Flächengewicht [kg/m²] des Pflanzenbewuchses und $\lambda + \lambda_V = \lambda_{e,BI}$ die effektive Verweilkonstante der Radionuklide auf der Pflanzenoberfläche mit der nicht radioaktiv bedingten Zerfallskonstante auf der Pflanzenoberfläche λ_V . Die Lösung des Integrals ergibt in erntefrischen Pflanzen bei obiger Annahme konstanter Abgaben folgende Nuklidkonzentration durch Ablagerung auf die Pflanzenoberfläche:

$$C_{Pfl,BI}(t) = C_{Pfl,BI}^0 = \dot{Q} \cdot \xi'_L / Y_{Pfl} \cdot (1 - e^{-\lambda_{e,BI} \cdot T_{Pfl}}) / \lambda_{e,BI} \cong \dot{Q} \cdot \xi'_L / Y_{Pfl} / \lambda_{e,BI}$$

Durch die Näherungsformel ergibt sich eine Überschätzung von $C_{Pfl,BI}^0$ von maximal ca. 20 %. Mit Hilfe der Transferfaktoren TF_{Bo-Pfl} vom Boden in die Pflanze ergibt sich die folgende zeitabhängige Konzentration in den **erntefrischen Pflanzen**:

$$C_{Pfl,W}(t) = C_{Bo}(0) \cdot TF_{Bo-Pfl} \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} \cdot t} = C_{Pfl,W}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,Bo} \cdot t}$$

In **Lagerpflanzen** ergibt sich die mittlere Nuklidkonzentration $C_{Pfl,L}^0$ am Ende der Ernteperiode durch die folgende Mittelung der Konzentration in Frischprodukten über die Einlagerungsperiode T_P :

$$C_{Pfl,L}^0 = \frac{1}{T_P} \int_{T_E}^{T_P + T_E} [C_{Pfl,BI}(t') + C_{Pfl,W}(t')] \cdot e^{-\lambda(T_P + T_E - t')} dt'$$

Dabei wird der Beginn der Ernteperiode mit T_E bezeichnet. Für Langzeitabgaben ist für T_P ein Wert von $T_1/2$ Jahre ($T_1 = 1$ Jahr) einzusetzen. Löst man dieses Integral und berücksichtigt zusätzlich den radioaktiven Zerfall der Nuklide im Lager im Winterhalbjahr, so erhält man:

$$C_{Pfl,L}(t) = C_{Pfl,L}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot (t - T_E - T_1/2)} = [C_{Pfl,BI}^0 \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda \cdot T_1/2} + C_{Pfl,W}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot (T_1/2 + T_E)}] \cdot e^{-\lambda \cdot (t - \{T_E + T_1/2\})}$$

Hinweis: der Term $e^{-\lambda_W \cdot T_E} \cdot (1 - e^{-\lambda_W \cdot T_P}) / (\lambda_W \cdot T_P)$, der bei der obigen Integration für den Wurzelbereich entsteht, darf 1 gesetzt werden, da der Term $\lambda_W \cdot T_P$ in jedem Fall viel kleiner als 1 ist (Taylor-Entwicklung) und der Term $\lambda_W \cdot T_E$ gegen 0 geht.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich schliesslich die zeitabhängige Konzentration in verbrauchsbereiten Pflanzen bei Langzeitabgaben:

während des Sommerhalbjahres (Ernteperiode 16. April - 15. Oktober):

$$C_{Pfl}(t) = C_{Pfl,BI}(t) + C_{Pfl,W}(t) = C_{Pfl,BI}^0 + C_{Pfl,W}^0 \cdot e^{-\lambda_e \cdot t}$$

während des Winterhalbjahres (16. Oktober - 15. April, $t > T_E + T_1/2$):

$$C_{Pfl}(t) = C_{Pfl,L}(t) = C_{Pfl,BI}^0 \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda \cdot T_1/2} \cdot e^{-\lambda \cdot (t - \{T_E + T_1/2\})} + C_{Pfl,W}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

mit

$$C_{Pfl,BI}^0 = \dot{Q} \cdot \xi' L / Y_{Pfl} / \lambda_{e,BI}$$

$$C_{Pfl,W}^0 = C_{Bo}(0) \cdot TF_{Bo-Pfl}$$

Anhang 5: Formeln zur Berechnung der Dosen in der Umgebung

Sämtliche im Folgenden angegebenen Formeln beziehen sich auf Einzelnuclide. Um die gesamte Dosis eines Pfades zu erhalten, muss über alle beteiligten Nuclide aufsummiert werden. Zur Berücksichtigung von Mutternukliden und Tochterprodukten vgl. A.5.9

A.5.1 Externe Strahlung aus der Luft (Edelgase, Iod, Aerosole)

Herleitung

Durch Integration über die Expositionszeit T' in der Fahne ergibt sich die korrigierte Immersionsdosis E_{imm} aus der Abgaberate $\dot{Q}(t)$ sowohl für Kurz- wie für Langzeitabgaben:

$$E_{imm} = \int_0^{T'} \dot{Q}(t') / k_c \cdot \chi_s \cdot e_{imm} \cdot k_s \cdot [e^{-\lambda T_{fz}}] \cdot dt'$$

Die Expositionszeit in der Fahne darf mit der Dauer der Abgabe gleichgesetzt werden. $\dot{Q}(t)$ ist in der obigen Formel die einzige zeitabhängige Grösse, so dass die Endformel nur noch von der Gesamtabgabe Q über den betrachteten Zeitraum abhängt.

Endformel

Kurz- und Langzeitabgaben:

$$E_{imm} = Q / k_c \cdot \chi_s \cdot k_s \cdot (e^{-\lambda T_{fz}}) \cdot e_{imm}$$

Bezeichnungen

E_{imm}	Immersionsdosis [Sv]
e_{imm}	Immersionsdosisfaktor [(Sv/Jahr)/(Bq/m ³)]
k_c	Umrechnungsfaktor von Jahren in Sekunden [s/Jahr]
k_s	Abschirmkoeffizient durch partiellen Aufenthalt in Häusern
Q	Gesamtabgaben [Bq]
T_{fz}	Flugzeit bis zum Hauptaufschlagspunkt
λ	radioaktive Zerfallskonstante; $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$, mit $T_{1/2}$ Halbwertszeit
χ_s	Submersionskorrigierter Kurzzeit- ($\chi_{K,S}$) resp. Langzeitausbreitungsfaktor ($\chi_{L,S}$) [s/m ³]
(...)	Flugzeitzerfallskorrektur

A.5.2 Inhalation und Resuspension (Luftpfad: Iod, Aerosole)

Voraussetzung

Die Inhalationsdosis ist direkt proportional zur Nuklidkonzentration in der Luft. Die maximale Inhalationsdosis ergibt sich somit am Punkt mit maximaler Nuklidkonzentration in der Luft.

Herleitung

Sowohl für Kurz- wie für Langzeitabgaben ergibt sich die Inhalationsdosis E_{inh} durch die folgende Integration über die Expositionszeit T' aus der Abgaberate $\dot{Q}(t)$:

$$E_{inh} = \int_0^{T'} \dot{Q}(t') \cdot \chi \cdot U_{inh} \cdot e_{inh} \cdot dt'$$

Da die Expositionzeit der Abgabedauer gleichgesetzt werden kann und $\dot{Q}(t)$ der einzige zeitabhängige Parameter in obiger Formel ist, ist die Endformel zur Bestimmung von E_{inh} nur noch von der Gesamtabgabemenge Q im betrachteten Zeitraum abhängig.

Endformel

Kurz- und Langzeitabgaben:

$$E_{inh} = Q \cdot \chi \cdot [e^{-\lambda \cdot T_{fz}}] \cdot U_{inh} \cdot e_{inh}$$

Bei **Störfallbetrachtungen** ist während der ersten 8 Stunden von einer erhöhten Atemrate U_{inh} auszugehen. Ausserdem ist bei Auslegung gegen Störfälle die Inhalation von **wiederaufgewirbelten Stoffen** durch Addition des Dosisanteils E_{inh}^{resusp} zur obigen Formel zu berücksichtigen [vgl. Till & Meyer (1983)].

Resuspension: für die Prüfung der Auslegung bei Störfällen:

$$E_{inh}^{resusp} = Q \cdot \xi_K \cdot \left(K_0 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda+L) \cdot T}}{\lambda+L} + K_e \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T}}{\lambda} \right) \cdot k_c \cdot U_{inh} \cdot e_{inh}$$

Bezeichnungen

E_{inh}	Inhalationsdosis [Sv]
E_{inh}^{resusp}	Inhalationsdosis [Sv] durch resuspendierte Aerosole
e_{inh}	Inhalationsdosisfaktor [Sv/Bq]
K_0, K_e	Wiederaufwirbelungskoeffizienten [m^{-1}]
k_c	Umrechnungsfaktor von Jahren in Sekunden [s/Jahr]
L	Zerfallskonstante für Immobilisierung am Boden [Jahre $^{-1}$]
Q	Gesamtabgaben [Bq]
T	Expositionszeit

U_{inh}	Atemrate [m^3/s]
λ	radioaktive Zerfallskonstante [$Jahre^{-1}$]
ξ_K	Totaler Kurzzeitablagerungsfaktor [m^{-2}]
χ	Kurzzeit- (χ_K) resp. Langzeitausbreitungsfaktor (χ_L) [s/m^3]
[...]	Flugzeitzerfallskorrektur (für Inhalation)

A.5.3 Bodenstrahlung (Luftpfad: Iod, Aerosole)

Voraussetzung

Die für die externe Strahlung wirksame Bodenaktivität $A(t)$ wird gemäss A1.3.1 für Kurz- resp. Langzeitabgaben bestimmt. Im Normalbetrieb ist für Iod davon auszugehen, dass nur ein Anteil f_{ei} in elementarer Form abgegeben wird; elementares Iod wird in viel grösserem Mass abgelagert als aerosolförmiges oder organisches Iod, so dass im allgemeinen bei der Bodenstrahlung nur der elementare Anteil des Iods einen dosisrelevanten Beitrag liefert und somit berücksichtigt werden muss.

Bei Auslegungstörfällen müssen die verschiedenen Iod-Spezies gemäss den störfallspezifischen Quelltermannahmen berücksichtigt werden.

Herleitung

Die Dosis aus externer Bodenstrahlung ergibt sich als Integral der Dosisrate über die Expositionszeit. Es gilt daher

$$E_{BS} = \int_0^T k_s \cdot e_{BS} \cdot A(t) \cdot dt = k_s \cdot e_{BS} \cdot \int_0^T A(t) \cdot dt$$

mit einem Abschirmfaktor k_s und dem Dosisfaktor e_{BS} . Nach Lösung der Integrale erhält man die folgenden **Endformeln**:

Kurzzeitabgaben:

$$E_{BS} = Q \cdot \xi_K \cdot [0.63 \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_{fast})T}) / (\lambda + \lambda_{fast}) + 0.37 \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_{slow})T}) / (\lambda + \lambda_{slow})] \cdot k_s \cdot e_{BS}$$

Langzeitabgaben:

$$E_{BS} = \{A(0) \cdot (1 - e^{-\lambda T}) / \lambda + [\dot{Q} \cdot \xi_L] / \lambda \cdot (T - (1 - e^{-\lambda T}) / \lambda)\} \cdot k_s \cdot e_{BS}$$

Bezeichnungen

$A(0)$	für die externe Strahlung wirksame Aktivität am Boden zu Beginn des Kalenderjahres aufgrund der Ablagerungen der Vorjahre [Bq/m^2] (vgl. A1.3.1)
E_{BS}	Im Kalenderjahr resp. in der einer Kurzzeitabgabe folgenden Expositionszeit akkumulierte Dosis [Sv]

e_{BS}	Bodenstrahlungs-Dosisfaktor [(Sv/Jahr)/(Bq/m ²)]
f_{ei}	Anteil des elementar abgegebenen Iods an der Gesamt-Iodabgabe
k_s	Abschirmfaktor durch partiellen Aufenthalt in Häusern
\dot{Q}	Abgaberate [Bq/Jahr], über ein Jahr homogen angenommen
Q	Gesamtabgabe [Bq]; für Iod ist Q die Abgabe des elementaren Iods
T	Expositionszeit [Jahre]
λ	radioaktive Zerfallskonstante [Jahre ⁻¹]; $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$, mit $T_{1/2}$ Halbwertszeit
$\lambda_{fast}, \lambda_{slow}$	Zerfallskonstanten für rasches resp. langsames Abklingen der externen Strahlung aufgrund des Eindringens in den Boden [Jahre ⁻¹] [vgl. Till & Meyer (1983)]
ξ	Totaler Kurzzeit- (ξ_K) resp. Langzeit-Ablagerungsfaktor (ξ_L) [m ⁻²].

A.5.4 Ingestion (Luftpfad: Iod, Aerosole)

Voraussetzung

Die verschiedenen Nahrungsmittel (Pflanzen, Milch, Fleisch) werden als Kompartimente betrachtet. Die Berechnung der Nuklidkonzentration in und auf Pflanzen erfolgt gemäss A1.3.2 resp. A1.4. Die Beschreibung des Übergangs von Pflanzen auf tierische Produkte erfolgt mit Transferfaktoren.

Beim Iod liefert – vor allem beim Kleinkind – die Ingestion von Milch einen grossen Anteil an der Gesamtdosis. Diesem besonderen Umstand wurde in früheren Jahren Beachtung geschenkt, indem für die Berechnung der Iodkonzentration in der Milch direkt ein Transferfaktor Boden-Milch definiert wurde. Es kann aber gezeigt werden, dass neben der Milch vor allem der Verzehr von Gemüse ebenfalls einen signifikanten Anteil an der Gesamtdosis liefern kann. Aus diesem Grund wird hier auf die spezielle Berechnungsweise für Iod verzichtet und es werden die geringfügig angepassten Formeln für die Berechnung der Ingestionsdosis durch Aerosole angewendet, welche im folgenden dargelegt werden. Dabei gilt es allerdings zusätzlich die folgenden Punkte zu beachten:

- Für kurzlebige Iodisotope (alle, mit Ausnahme von ¹²⁵I, ¹²⁶I und ¹²⁹I) kann sowohl auf eine Betrachtung der Ablagerungen der Vorjahre wie der Aufnahme über die Pflanzenwurzeln verzichtet werden, d. h. $A(0)$ und der Transferfaktor TF_{Bo-Pfl} werden 0 gesetzt. Es wird somit nur die reine Ablagerung des Iods auf die Blätter betrachtet.
- Im Normalbetrieb muss berücksichtigt werden, dass nur ein Anteil f_{ei} der Gesamt-Iodabgabe elementar abgegeben wird und einen signifikanten Beitrag zur Dosis liefert (vgl. dazu A2.3). Für Ingestions-Dosisberechnungen ist somit im allgemeinen die Abgabe des elementaren Iods einzusetzen.
- Bei Auslegungsstörfällen müssen die verschiedenen Iod-Spezies gemäss dem störfallspezifischen Quellterm berücksichtigt werden.

- Sowohl für die Ablagerungsgeschwindigkeit v_g wie auch für die Verweilzeit des Iods auf den Pflanzenblättern müssen angepasste Werte verwendet werden.

Annahmen

Während der Ernteperioden (16. April - 15. Oktober) wird der gesamte Bedarf an Lebensmitteln mit Frischprodukten gedeckt. Im Winterhalbjahr besteht der gesamte Lebensmittelbedarf für Gemüse und Obst aus Lagerprodukten oder – bei Milch und Fleisch – aus Produkten, die mit Silo- oder Heufütterung produziert wurden.

Die Berechnung der Ingestionsdosis bei **Langzeitabgaben** erfolgt für die Lebensmittelproduktion des laufenden Kalenderjahres; die gesamte Lagerproduktion des laufenden Kalenderjahres, d. h. auch Produkte, welche erst in den ersten Monaten des Folgejahres verzehrt werden, wird somit für die Dosisberechnungen dem laufenden Kalenderjahres zugeschlagen. Hingegen werden die zwischen dem 1. Januar und dem 15. April des Kalenderjahres verzehrten Lagerprodukte dem Vorjahr zugerechnet.

Bei einer **Kurzzeitabgabe** wird für Limitierungs- und Auslegungsrechnungen bei der Berechnung der Dosis die Annahme getroffen, dass die Abgabe einen Monat vor Ende der Ernteperiode erfolgt. Die auf der Pflanzenoberfläche abgelagerten Nuklide werden nur im 1. Jahr aufgenommen; daher wird für Kleinkinder dieser Anteil der Ingestionsdosis mit den speziellen Dosisfaktoren und Verzehraten für 1-jährige Kinder berechnet; der Ingestionsdosisanteil infolge des Aktivitätstransfers über die Pflanzenwurzeln, der erst in den Folgejahren wirksam wird, wird jedoch immer mit den Dosisfaktoren und Verzehraten für Erwachsene bestimmt (dies wird in den Formeln mit dem zusätzlichen Index E gekennzeichnet).

Zur Berechnung der Dosis nach **aktuell erfolgten, kurzzeitigen Abgaben** sind in den Formeln zur Berechnung der Ingestionsdosis nach einer Kurzzeitabgabe die Expositionsdauer T und die Dauer T_P bis zum Ende der Ernteperiode anzupassen. Dabei sind die Vorgaben des Dosismassnahmenkonzeptes (DMK) der BevSV und gegebenenfalls dosisreduzierende Schutzmassnahmen, wie z. B. Frischverzehr nur während 24 oder 48 Stunden und Sperrung von kontaminierten Lagerprodukten zu berücksichtigen.

Herleitung für Verzehr von pflanzlichen Produkten

Für **Kurzzeitabgaben während der Ernteperiode** (d. h. $T_P < 1/2$ Jahr) ergibt sich mit den Konzentrationen in verbrauchsreifen Pflanzen aus Anhang 4 für die Zeitdauer T_P bis zum Ende der Ernteperiode und mit dem Ansatz $T^* = \text{Min}(T_{PP}, T_P)$ die folgende Dosis:

$$E_{\text{ing,PP}} = U_{\text{PP}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot \left\{ \int_0^{T^*} C_{\text{PP,BI}}^0 \cdot e^{-\lambda_e \cdot \text{BI} \cdot t'} dt' + \int_{T_P}^{T_P + T_1/2} C_{\text{PP,BI}}^0 \cdot e^{-\lambda_e \cdot t'} / (\lambda_V \cdot T_1/2) \cdot dt' \right\}$$

$$+ U_{\text{PP,E}} \cdot e_{\text{ing,E}} \cdot \left\{ \int_{T_P + T_1/2}^T C_{\text{PP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda_e \cdot \text{Bo} \cdot t'} dt' \right\}$$

Für **Kurzzeitabgaben im Winter** gilt ($T_P > 1/2$ Jahr; nur für tatsächliche Abgaben):

$$E_{\text{ing,PP}} = U_{\text{PP,E}} \cdot e_{\text{ing,E}} \cdot \left\{ \int_{T_P - 1/2}^T C_{\text{PP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot t'} dt' \right\}$$

Für **Langzeitabgaben** ergibt sich mit den obigen Annahmen und den in Anhang 4 hergeleiteten Konzentrationen in verbrauchsbereiten pflanzlichen Produkten (PP):

$$E_{\text{ing,PP}} = U_{\text{PP}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot \left\{ \int_{T_E}^{T_E + T_1/2} C_{\text{PP,BI}}^0 dt' + \int_{T_E}^{T_E + T_1/2} C_{\text{PP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot t'} dt' \right. \\ \left. + \int_{T_E + T_1/2}^{T_E + T_1} C_{\text{PP,BI}}^0 \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda \cdot T_1/2} \cdot e^{-\lambda \cdot (t' - \{T_E + T_1/2\})} dt' + \int_{T_E + T_1/2}^{T_E + T_1} C_{\text{PP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot t'} dt' \right\}$$

Darin bedeutet U_{PP} die Verzehrrate pflanzlicher Produkte, e_{ing} den Ingestionsdosisfaktor je nachdem für das Kleinkind oder den Erwachsenen und T_E den Beginn der Ernteperiode (16. April).

Herleitung für Verzehr von Milch und Milchprodukten

Die Nuklidkonzentration $C_{\text{Mi}}(t)$ in der Milch erhält man aus der Konzentration der Radionuklide in den Futterpflanzen $C_{\text{FP}}(t)$ durch Multiplikation mit dem Transferfaktor $TF_{\text{FP-Mi}}$ und der täglichen Futtermenge V_{FP} für Kühe:

$$C_{\text{Mi}}(t) = V_{\text{FP}} \cdot C_{\text{FP}}(t) \cdot TF_{\text{FP-Mi}}$$

Die Ingestionsdosisrate $\dot{E}_{\text{ing,Mi}}$ ergibt sich daraus mit Hilfe der Verzehrrate für Milch U_{Mi} und dem Ingestionsdosisfaktor e_{ing} als:

$$\dot{E}_{\text{ing,Mi}} = C_{\text{Mi}}(t) \cdot U_{\text{Mi}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot e^{-\lambda T_{\text{Mi}}}$$

Der Exponentialterm berücksichtigt eine Verarbeitungszeit T_{Mi} der Milch vor dem Verzehr. Die Dosis ergibt sich durch Integration über die Expositionszeit T :

Kurzzeitabgaben während der Ernteperiode

$$E_{\text{ing,Mi}} = V_{\text{FP}} \cdot TF_{\text{FP-Mi}} \cdot e^{-\lambda T_{\text{Mi}}} \cdot \left\{ U_{\text{Mi,E}} \cdot e_{\text{ing,E}} \cdot \int_{T_P + T_1/2}^T C_{\text{FP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot t'} dt' \right. \\ \left. + U_{\text{Mi}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot \left[\int_0^{T^*} C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,\text{BI}} \cdot t'} dt' + \int_{T_P}^{T_P + T_1/2} C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot t'} / (\lambda \cdot T_1/2) dt' \right] \right\}$$

Kurzzeitabgaben während des Winterhalbjahres

$$E_{\text{ing,Mi}} = V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Mi}} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{\text{Mi}}} \cdot \{U_{\text{Mi,E}} \cdot e_{\text{ing,E}} \cdot \int_{T_{\text{p}}-1/2}^T C_{\text{FP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda_{\text{e,Bo}} \cdot t'} \cdot dt'\}$$

Langzeitabgaben

$$E_{\text{ing,Mi}} = V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Mi}} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{\text{Mi}}} \cdot U_{\text{Mi}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot \left\{ \int_{T_{\text{E}}}^{T_{\text{E}}+T_1/2} C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot dt' + \int_{T_{\text{E}}}^{T_{\text{E}}+T_1/2} C_{\text{FP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda_{\text{e,Bo}} \cdot t'} \cdot dt' \right. \\ \left. + \int_{T_{\text{E}}+T_1/2}^{T_{\text{E}}+T_1} C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda \cdot T_1/2} \cdot e^{-\lambda \cdot (t' - \{T_{\text{E}}+T_1/2\})} \cdot dt' + \int_{T_{\text{E}}+T_1/2}^{T_{\text{E}}+T_1} C_{\text{FP,W}}^0 \cdot e^{-\lambda \cdot t'} \cdot dt' \right\}$$

Herleitung für Verzehr von Fleisch

Die Dosis aus dem Fleischverzehr wird aus analogen Überlegungen zum Milchverzehr abgeleitet. Dabei ist in den Formeln der Index Mi überall durch den Index FI zu ersetzen.

Bei der Lösung der Integrale darf jeweils $\lambda \cong \lambda_{\text{e,Bo}}$ gesetzt und die Endformel somit vereinfacht werden. Ausserdem können Terme $1 - e^{-\lambda_{\text{e,BI}} \cdot T^*}$ und $1 - e^{-\lambda_{\text{e,BI}} \cdot T_{\text{Pfl}}}$ in den hier zu betrachtenden Fällen ungefähr gleich 1 gesetzt werden (dies kann zu einer Überschätzung von maximal 20 % bei der Dosis führen).

Totale Ingestionsdosis

Zusammenfassend ergibt sich die totale Ingestionsdosis über den Luftpfad:

Kurzzeitabgaben

Totale Ingestionsdosis nach einer Kurzzeitabgabe für Gemüse, Milch und Fleisch:

$E_{\text{ing}} = E_{\text{ing,PP}} + E_{\text{ing,Mi}} + E_{\text{ing,FI}}$
--

Abgabe in der Ernteperiode ($T_P < 1/2$)

Pflanzliche Produkte (Gemüse):

$$E_{\text{ing,PP}} = C_{\text{PP,BI}}^0 \left[\frac{1}{\lambda_{e,\text{BI}}} + e^{-\lambda \cdot T_P} \cdot \frac{1}{\lambda_v \cdot T_1/2} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda} \right] \cdot U_{\text{PP}} \cdot e_{\text{ing}} \\ + C_{\text{PP,W}}^0 \cdot \frac{(e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T})}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \cdot U_{\text{PP,E}} \cdot e_{\text{ing,E}}$$

Milch und Milchprodukte:

$$E_{\text{ing,Mi}} = \left\{ C_{\text{FP,BI}}^0 \left[\frac{1}{\lambda_{e,\text{BI}}} + e^{-\lambda \cdot T_P} \cdot \frac{1}{\lambda_v \cdot T_1/2} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda} \right] \cdot U_{\text{Mi}} \cdot e_{\text{ing}} \right. \\ \left. + C_{\text{FP,W}}^0 \cdot \frac{(e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T})}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \cdot U_{\text{Mi,E}} \cdot e_{\text{ing,E}} \right\} \cdot V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Mi}} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{\text{Mi}}}$$

Fleisch:

$$E_{\text{ing,Fl}} = \left\{ C_{\text{FP,BI}}^0 \left[\frac{1}{\lambda_{e,\text{BI}}} + e^{-\lambda \cdot T_P} \cdot \frac{1}{\lambda_v \cdot T_1/2} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_1/2}}{\lambda} \right] \cdot U_{\text{Fl}} \cdot e_{\text{ing}} \right. \\ \left. + C_{\text{FP,W}}^0 \cdot \frac{(e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T})}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \cdot U_{\text{Fl,E}} \cdot e_{\text{ing,E}} \right\} \cdot V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Fl}} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{\text{Fl}}}$$

mit:

$$C_{\text{Pfl,BI}}^0 = Q \cdot \xi'_{\text{K}} / Y_{\text{Pfl}}$$

$$C_{\text{Pfl,W}}^0 = Q \cdot \xi_{\text{K}} \cdot T_{\text{FBo-Pfl}} / P_{\text{Pfl}}$$

Abgabe im Winterhalbjahr:

$$E_{\text{ing,PP}} = C_{\text{PP,W}}^0 \cdot \frac{(e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T})}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \cdot U_{\text{PP,E}} \cdot e_{\text{ing,E}}$$

$$E_{\text{ing,Mi}} = C_{\text{FP,W}}^0 \cdot \frac{(e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T})}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \cdot V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Mi}} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{\text{Mi}}} \cdot U_{\text{Mi,E}} \cdot e_{\text{ing,E}}$$

$$E_{\text{ing,Fl}} = C_{\text{FP,W}}^0 \cdot \frac{(e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T})}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \cdot V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Fl}} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{\text{Fl}}} \cdot U_{\text{Fl,E}} \cdot e_{\text{ing,E}}$$

Langzeitabgaben

Totale Ingestionsdosis über den Luftpfad für Gemüse, Milch und Fleisch (1 Jahr):

$$E_{\text{ins}} = E_{\text{ing,PP}} + E_{\text{ing,Mi}} + E_{\text{ing,Fl}}$$

Pflanzliche Produkte (Gemüse):

$$E_{\text{ing,PP}} = \left\{ C_{\text{PP,BI}}^0 \left[T_{1/2} + \frac{1}{T_{1/2}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}}{\lambda} \right)^2 \right] + C_{\text{PP,W}}^0 \cdot e^{-(\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_E)} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_1}}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \right\} \cdot U_{\text{PP}} \cdot e_{\text{ing}}$$

Milch und Milchprodukte:

$$E_{\text{ing,Mi}} = \left\{ C_{\text{FP,BI}}^0 \left[T_{1/2} + \frac{1}{T_{1/2}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}}{\lambda} \right)^2 \right] + C_{\text{FP,W}}^0 \cdot e^{-(\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_E)} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_1}}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \right\} \\ \cdot V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-Mi}} \cdot e^{-\lambda T_{\text{Mi}}} \cdot U_{\text{Mi}} \cdot e_{\text{ing}}$$

Fleisch:

$$E_{\text{ing,FI}} = \left\{ C_{\text{FP,BI}}^0 \left[T_{1/2} + \frac{1}{T_{1/2}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}}{\lambda} \right)^2 \right] + C_{\text{FP,W}}^0 \cdot e^{-(\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_E)} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo}} \cdot T_1}}{\lambda_{e,\text{Bo}}} \right\} \\ \cdot V_{\text{FP}} \cdot T_{\text{FP-FI}} \cdot e^{-\lambda T_{\text{FI}}} \cdot U_{\text{FI}} \cdot e_{\text{ing}}$$

mit

$$C_{\text{Pfl,BI}}^0 = \dot{Q} \cdot \xi'_L / Y_{\text{Pfl}} / \lambda_{e,\text{BI}}$$

$$C_{\text{Pfl,W}}^0 = C_{\text{Bo}}(0) \cdot T_{\text{Bo-Pfl}}$$

für $C_{\text{Bo}}(0)$: vgl. A .3.2

Bezeichnungen

$C_{\text{PP,BI}}^0$, $C_{\text{FP,BI}}^0$ Konzentration in und auf pflanzl. Produkten resp. Futterpflanzen durch Pflanzenablagerungen direkt nach der Ablagerung [Bq/kg]

$C_{\text{PP,W}}^0$, $C_{\text{FP,W}}^0$ Konzentration in pflanzl. Produkten resp. Futterpflanzen, die sich direkt nach einer Kurzzeitabgabe bei sofortiger Einmischung in den Wurzelbereich durch Transfer über den Boden in die Pflanzen ergeben würde, resp. Konzentration zu Beginn eines Kalenderjahres bei Langzeitabgaben [Bq/kg]

$E_{\text{ing,PP}}$ Ingestionsdosis durch Verzehr von Gemüse [Sv]

$E_{\text{ing,Mi}}$ Ingestionsdosis durch Verzehr von Milch [Sv]

$E_{\text{ing,FI}}$ Ingestionsdosis durch Verzehr von Fleisch [Sv]

E_{ing} Totale Ingestionsdosis über den Luftpfad [Sv]

e_{ing}	<i>Ingestionsdosisfaktor [Sv/Bq]</i> <i>Ein zusätzlicher Index E bei den Verzehrdaten U und dem Ingestionsdosisfaktor e_{ing} bedeutet, dass sowohl für Kleinkinder wie Erwachsene jeweils die Parameter für Erwachsene einzusetzen sind.</i>
f_{ei}	<i>Anteil des elementaren Iods an der Gesamtiodabgabe</i>
T	<i>Expositionsdauer</i>
T_E	<i>Beginn der Ernteperiode relativ zum Kalenderjahr [Jahre]</i>
T_P	<i>Dauer zwischen der Abgabe und dem Ende der Ernteperiode [Jahre]</i>
T_{Mi}, T_{Fi}	<i>Zeit zwischen Produktion und Verzehr von Milch und Fleisch [Jahre]</i>
TF_{FP-Mi}	<i>Transfer von Radionukliden aus dem Futter in die Milch [d/l]</i>
TF_{FP-Fi}	<i>Transfer von Radionukliden aus dem Futter ins Fleisch [d/kg]</i>
U_{Fi}	<i>Verzehrrate für Fleisch [kg/Jahr]</i>
U_{PP}	<i>Verzehrrate für Gemüse [kg/Jahr]</i>
U_{Mi}	<i>Verzehrrate für Milch [l/Jahr]</i>
V_{FP}	<i>Täglicher Futterbedarf von Milchkühen [kg/d]</i>
λ	<i>radioaktive Zerfallskonstante [Jahre⁻¹]</i>
$\lambda_{e,BI}$	<i>totale Verweilkonstante der Nuklide auf der Pflanze [Jahre⁻¹]</i>
$\lambda_{e,Bo}$	<i>totale Verweilkonstante der Nuklide im Boden [Jahre⁻¹]</i>
λ_V	<i>nicht radioaktive Verweilkonstante der Nuklide auf der Pflanze [Jahre⁻¹]</i>

A.5.5 Ingestion (Luftpfad: ¹⁴C)

Eine Berechnung der Dosis durch ¹⁴C-Ingestion erfolgt im allgemeinen im Rahmen der Jahresberichterstattung, aber nur in Spezialfällen für die Festlegung von Grenzwerten.

Voraussetzungen

- Für die Berechnung wird angenommen, dass die Aufnahme in die Pflanzen rein über Photosynthese über die Blätter erfolgt. Somit spielt nur die Konzentration des ¹⁴C in CO₂-Form in der Luft eine Rolle für die Berechnung. Auswascheffekte sind dagegen vernachlässigbar.
- Es wird von einem spezifischen Aktivitätsmodell ausgegangen, d. h. es wird angenommen, dass das Verhältnis ¹²C/¹⁴C in der Pflanze (und in der Folge auch in sämtlichen tierischen Produkten) identisch ist wie in der Luft.
- Der mittlere Kohlenstoff-Massenanteil in getrockneten Nahrungsmitteln wird zu 50 % angenommen, der mittlere Wassergehalt von Nahrungsmitteln zu 75 %. Somit ergibt sich ein mittlerer Massenanteil von Kohlenstoff in den Pflanzen von 12,5 % oder 1/8.

Diese Annahmen führen zu folgender **Endformel**:

$$E_{\text{ing,C-14}} = Q/k_c \cdot \chi \cdot f_K / \Psi \cdot (U_{PP} + U_{Mi} + U_{FI}) \cdot e_{\text{ing}}$$

Bezeichnungen

$E_{\text{ing,C-14}}$	Ingestionsdosis durch ^{14}C
e_{ing}	Ingestionsdosisfaktor für ^{14}C [Sv/Bq]
f_K	Massenanteil des Kohlenstoffs in der Nahrung
k_c	Umrechnung Jahr-Sekunden [s/Jahr]
Q	Abgabe von ^{14}C (in der Form von CO_2) im Jahr [Bq]
U_{FI}	Verzehrrate für Fleisch [kg/Jahr]
U_{Mi}	Verzehrrate für Milch [kg/Jahr]
U_{PP}	Verzehrrate für Gemüse [kg/Jahr]
χ	Kurzzeit- (χ_K) resp. Langzeitausbreitungsfaktor (χ_L) [s/m^3]
Ψ	Kohlenstoffkonzentration in der Luft [kg/m^3]

A.5.6 Ingestion/Inhalation (Luftpfad: tritiierte Luftfeuchtigkeit; HTO)

Eine Berechnung der Dosis durch HTO-Ingestion und -Inhalation erfolgt nur in Spezialfällen für die Jahresberichterstattung und die Abgabelimitierung.

Voraussetzungen

Für die Berechnung der Konzentration in Lebensmitteln wird davon ausgegangen, dass sich ein Gleichgewichtszustand so einstellt, dass die spezifische ^3H -Aktivität der Luftfeuchte resp. des Niederschlages gleich der spezifischen Tritium-Aktivität im Wasser in den Pflanzen ist. Bei den tierischen Produkten (Milch, Fleisch) wird vorausgesetzt, dass der Wassergehalt zu einem Anteil f_F aus dem Futter stammt.

Die Inhalationsdosis berechnet sich aus den Formeln gemäss A.5.2.

Endformel (Ingestion und Inhalation)

Lang- und Kurzzeitabgaben:

$$E_{\text{tot,HTO}} = Q \cdot \{ (f_{Lu} \cdot \chi / [\Phi \cdot k_c] + f_N / [I_N \cdot k_N] \cdot W_L) \cdot f_{Wa} \cdot (U_{PP} + f_F \cdot [U_{Mi} + U_{FI}]) \cdot e_{\text{ing}} + \chi \cdot U_{\text{inh}} \cdot e_{\text{inh}} \}$$

Solange für Langzeitabgaben keine Berechnung des Langzeitwashoutfaktors W_L vorliegt und allgemein für Kurzzeitabgaben wird $f_N=0$ und $f_{Lu}=1$ gesetzt (vgl. Anhang 6).

Bezeichnungen

$E_{\text{ing,HTO}}$	Ingestionsdosis durch tritiiertes Wasser [Sv]
e_{ing}	Ingestionsdosisfaktor für tritiiertes Wasser [Sv/Bq]

e_{inh}	Inhalationsdosisfaktor für tritiiertes Wasser [Sv/Bq]
f_F	Wasseranteil in Milch und Fleisch, der aus dem Futter stammt
f_{Lu}	Wasseranteil in den Pflanzen, der aus der Luftfeuchte stammt
f_N	Wasseranteil in den Pflanzen, der aus dem Niederschlag stammt
f_{Wa}	Mittlerer Feuchteanteil von Nahrungsmitteln
I_N	Jährliche Niederschlagsmenge [mm/Jahr] resp. Niederschlagsintensität bei Kurzzeitabgaben [mm/h]
k_c	Umrechnung Jahr-Sekunden [s/Jahr]
k_N	Umrechnungskonstante von mm Niederschlag in kg pro m^2
Q	Abgabe von tritiiertem Wasser im Jahr resp. gesamte Kurzzeitabgabe [Bq]
U_{Fi}	Verzehrrate für Fleisch [kg/Jahr]
U_{inh}	Atemrate [m^3/s]
U_{Mi}	Verzehrrate für Milch [kg/Jahr]
U_{PP}	Verzehrrate für Gemüse [kg/Jahr]
W_L	Langzeitwashoutfaktor [m^{-2}]
χ	Kurzzeit- (χ_k) resp. Langzeitausbreitungsfaktor (χ_L) [s/m^3]
Φ	Mittlere Luftfeuchtigkeit [kg/m^3]

A.5.7 Ingestion (Wasserpfad, ohne Tritium)

Voraussetzung

Sofern von einem quasikontinuierlichen Nahrungsmittelverzehr ausgegangen wird, spielt die Dauer der Abgaben keine Rolle. Für die Ingestion werden Trinkwasser- und Fischverzehr sowie die Ingestion von Milch und Fleisch von Tieren, die mit Flusswasser getränkt wurden, berücksichtigt. Für den Transfer vom Trinkwasser in tierische Produkte wird dabei ein identischer Transferfaktor wie zwischen Futter und tierischen Produkten angenommen.

Die Dosis über ein Jahr ergibt sich somit aus der folgenden **Endformel**:

$$E_{ing,WP} = \{Q/J\} \cdot (U_{TW} + TF_{Wa-Fi} \cdot U_{Fi} \cdot e^{-\lambda T_{Fi}} + V_{TW} \cdot \{TF_{FP-Mi} \cdot U_{Mi} \cdot e^{-\lambda T_{Mi}} + TF_{FP-Fi} \cdot U_{Fi} \cdot e^{-\lambda T_{Fi}}\}) \cdot e_{ing}$$

Bezeichnungen

$E_{ing,WP}$	Ingestionsdosis im Jahr über den Wasserpfad [Sv]
e_{ing}	Ingestionsdosisfaktor [Sv/Bq]
J	Mittlerer Durchfluss des jeweiligen Flusses (Vorfluters) im Jahr [$m^3/Jahr$]
Q	Totale Abgaben an das Abwasser im Jahr [Bq]

TF_{Wa-Fi}	Transferfaktor Wasser-Fisch [m^3/kg]
TF_{FP-Mi}	Transferfaktor Futter-Milch [Tage/kg]
TF_{FP-Fi}	Transferfaktor Futter-Fleisch [Tage/kg]
T_{Fi}, T_{PP}, T_{Fi}	Zeit zwischen Produktion und Verzehr von Fisch, Gemüse resp. Fleisch
U_{Fi}	Jährlicher Verzehr von Fisch [kg/Jahr]
U_{Fi}	Jährlicher Verzehr von Fleisch [kg/Jahr]
U_{Mi}	Jährlicher Milchverbrauch (Milch und Milchprodukte) [kg/Jahr]
U_{TW}	Jährlicher Trinkwasserkonsum [$m^3/Jahr$]
V_{TW}	Täglicher Wasserverbrauch von Rindvieh [m^3/Tag]
λ	radioaktive Zerfallskonstante [Jahre ⁻¹]

A.5.8 Ingestion (Wasserpfad: tritiiertes Wasser; HTO)

Voraussetzungen

Für die Berechnung der Ingestion von Tritium über den Wasserpfad werden Trinkwasser- und Fischverzehr sowie Ingestion von Milch und Fleisch von Tieren, die mit Flusswasser getränkt wurden, berücksichtigt. Für die Tritiumaufnahme in die Fische und in tierische Produkte wird von einem spezifischen Aktivitätsmodell ausgegangen, wobei bei den Tieren berücksichtigt werden muss, dass nur ein Teil des gesamten Wassergehaltes ($1-f_F$, vgl. A.5.6) aus dem Tränkewasser stammt.

Somit gilt für die Gesamt-Tritiumdosis aus dem Abwasserpfad die folgende **Endformel**:

$$E_{ing,HTO} = \{Q/J\} \cdot [U_{TW} + f_{Wa}/k_{mk} \cdot \{U_{Fi} + (1-f_F) \cdot (U_{Mi} + U_{Fi})\}] \cdot e_{ing}$$

Bezeichnungen

$E_{ing,HTO}$	Ingestionsdosis im Jahr durch Tritium über den Wasserpfad [Sv]
e_{ing}	Ingestionsdosisfaktor [Sv/Bq]
f_{Wa}	mittlerer Feuchteanteil von Nahrungsmitteln
$1-f_F$	Wasseranteil in Milch und Fleisch, der aus dem Tränkewasser stammt
J	mittlerer Durchfluss des jeweiligen Flusses ("Vorfluters") im Jahr [$m^3/Jahr$]
k_{mk}	Umrechnungsfaktor kg zu m^3 für Wasser [kg/m^3]
Q	Totale Abgaben an das Abwasser im Jahr [Bq]
U_{Fi}	jährlicher Verzehr von Fisch [kg/Jahr]
U_{Fi}	jährlicher Verzehr von Fleisch [kg/Jahr]
U_{Mi}	jährlicher Milchverbrauch (Milch und Milchprodukte) [kg/Jahr]
U_{TW}	jährlicher Trinkwasserkonsum [$m^3/Jahr$]

A.5.9 Berücksichtigung von Tochterprodukten – Kurzzeitabgaben

Bemerkungen

Der Dosisfaktor von Tochterprodukten mit Halbwertszeiten von weniger als 10 Minuten soll direkt zum Dosisfaktor der Mutter addiert werden.

Bei Tochterprodukten mit Halbwertszeiten, die sehr viel kleiner sind als die der Mutter, und **welche nicht separat gemessen werden**, ist bei der Abgabe von einem Gleichgewichtszustand auszugehen. Ausgenommen sind Töchter von Edelgasen, bei welchen angenommen werden kann, dass sie in den Abgabefiltern zurückgehalten werden. Terme, welche den Gleichgewichtszustand beschreiben, sind in den folgenden Formeln bis Kapitel A5.9.7 eingeraht. Diese Terme sind wegzulassen, wenn die direkte Abgabe der Tochter bereits anderweitig berücksichtigt wird!

Für Immersion und Inhalation gilt, dass die Abreicherung aus der Wolke bis zum Aufschlagpunkt vernachlässigt wird. Während der Flugzeit T_{fz} wird für Mutter und Töchter ausschliesslich der radioaktive Zerfall betrachtet.

Das in der ENSI-Richtlinie G14 erwähnte Modell der Aufteilung der Gesamtaktivität in einen schnell und einen langsam eindringenden Anteil wird konsequent verfolgt. Für einen schnell- resp. langsam eindringenden Anteil der Mutter wird angenommen, dass die entstehende Tochter ebenfalls dem gleichen Eindringungsanteil zugeordnet werden kann (schnell bleibt schnell eindringend auch nach dem Zerfall). Ist das Tochterprodukt ein Edelgas, so muss es für die Bodenstrahlung nicht berücksichtigt werden. Wenn die Mutter oder die Tochter ein Edelgas ist, wird bei der Ingestionsdosis das Tochterprodukt nicht berücksichtigt.

Bei der Ingestionsdosis werden auch für Kleinkinder beim Wurzeltransfer konservativ die Verzehr- und Dosisparameter der Erwachsenen verwendet, da die Aufnahme in diesem Fall nicht mehr unbedingt im Kindesalter erfolgen muss.

Bei der Ingestion darf für Aerosole und Iod von der berechtigten Annahme ausgegangen werden, dass die Nuklidgruppenzugehörigkeiten von Mutter und Tochter identisch sind, d. h. eine Aerosol-Mutter zerfällt in eine Aerosoltochter, eine (elementare) Iodmutter in eine Tochter, die sich wie elementares Iod verhält.

Hier nicht weiter erklärte Symbole sind identisch wie die in den vorherigen Anhängen verwendet.

A.5.9.1 Luftkonzentration

Mutter

$$C_{Lu,M} = \dot{Q} \cdot \chi \cdot e^{-\lambda_M T_{fz}}$$

Tochter i

$$C_{Lu,Ti} = \dot{Q} \cdot \chi \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} (e^{-\lambda_M T_{fz}} - e^{-\lambda_{Ti} T_{fz}}) \right] + \dot{Q} \cdot \chi \cdot f_i \cdot e^{-\lambda_{Ti} T_{fz}}$$

A.5.9.2 Bodenaktivität

Mutter

$$A_{Bo,M}(t) = A_{Bo,M}^{fast}(t) + A_{Bo,M}^{slow}(t) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot \left(0.63 \cdot e^{-(\lambda_M + \lambda_{fast})t} + 0.37 \cdot e^{-(\lambda_M + \lambda_{slow})t} \right)$$

wobei:

$$A_{Bo,M}^{fast}(t) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot 0.63 \cdot e^{-(\lambda_M + \lambda_{fast})t}$$

$$A_{Bo,M}^{slow}(t) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot 0.37 \cdot e^{-(\lambda_M + \lambda_{slow})t}$$

Tochter i

$$A_{Bo,Ti}(t) = A_{Bo,Ti}^{fast}(t) + A_{Bo,Ti}^{slow}(t) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot f_i \cdot \left(0.63 \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left[e^{-(\lambda_M + \lambda_{fast})t} - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})t} \right] + \right. \\ \left. 0.37 \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left[e^{-(\lambda_M + \lambda_{slow})t} - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})t} \right] \right) + \boxed{Q \cdot \xi_{K,Ti} \cdot f_i \cdot \left(0.63 \cdot e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})t} + 0.37 \cdot e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})t} \right)}$$

wobei:

$$A_{Bo,Ti}^{fast}(t) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot f_i \cdot 0.63 \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left[e^{-(\lambda_M + \lambda_{fast})t} - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})t} \right] + \boxed{Q \cdot \xi_{K,Ti} \cdot f_i \cdot 0.63 \cdot e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})t}}$$

$$A_{Bo,Ti}^{slow}(t) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot f_i \cdot 0.37 \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left[e^{-(\lambda_M + \lambda_{slow})t} - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})t} \right] + \boxed{Q \cdot \xi_{K,Ti} \cdot f_i \cdot 0.37 \cdot e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})t}}$$

A.5.9.3 Dosis aus Immersion

Mutter

$$E_{imm,M} = Q \cdot \chi_S \cdot k_s \cdot \left(\frac{e_{imm,M}}{k_c} \right) \cdot e^{-\lambda_M T_{fz}}$$

Tochter i

$$E_{imm,Ti} = Q \cdot \chi_S \cdot f_i \cdot k_s \cdot \left(\frac{e_{imm,Ti}}{k_c} \right) \cdot \left(\left[\frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \left(e^{-\lambda_M T_{fz}} - e^{-\lambda_{Ti} T_{fz}} \right) \right] + \boxed{e^{-\lambda_{Ti} T_{fz}}} \right)$$

A.5.9.4 Dosis aus Inhalation

Mutter

$$E_{inh,M} = Q \cdot \chi \cdot U_{inh} \cdot e_{inh,M} \cdot e^{-\lambda_M T_{fz}}$$

Tochter i

$$E_{inh,Ti} = Q \cdot \chi \cdot f_i \cdot U_{inh} \cdot e_{inh,Ti} \cdot \left(\left[\frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \left(e^{-\lambda_M T_{fe}} - e^{-\lambda_{Ti} T_{fe}} \right) \right] + \boxed{e^{-\lambda_{Ti} T_{fe}}} \right)$$

A.5.9.5 Dosis aus Bodenstrahlung

Mutter

$$E_{BS,M}(T) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot k_s \cdot e_{BS,M} \cdot \left(0.63 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_M + \lambda_{fast})T}}{\lambda_M + \lambda_{fast}} + 0.37 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_M + \lambda_{slow})T}}{\lambda_M + \lambda_{slow}} \right)$$

Tochter i

$$E_{BS,Ti}(T) = Q \cdot \xi_{K,M} \cdot f_i \cdot k_s \cdot e_{BS,Ti} \cdot \left(0.63 \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left[\frac{1 - e^{-(\lambda_M + \lambda_{fast})T}}{\lambda_M + \lambda_{fast}} - \frac{1 - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})T}}{\lambda_{Ti} + \lambda_{fast}} \right] + \right. \\ \left. 0.37 \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left[\frac{1 - e^{-(\lambda_M + \lambda_{slow})T}}{\lambda_M + \lambda_{slow}} - \frac{1 - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})T}}{\lambda_{Ti} + \lambda_{slow}} \right] \right) + \\ Q \cdot \xi_{K,Ti} \cdot f_i \cdot k_s \cdot e_{BS,Ti} \cdot \left(0.63 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})T}}{\lambda_{Ti} + \lambda_{fast}} + 0.37 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})T}}{\lambda_{Ti} + \lambda_{slow}} \right)$$

Spezialfall: Mutter ein Edelgas und Tochter ein Nicht-Edelgasnuklid

$$E_{BS,Ti}(T) = Q \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \left(e^{-\lambda_M T_{fe}} - e^{-\lambda_{Ti} T_{fe}} \right) \right] \cdot \xi_{K,Ti} \cdot k_s \cdot e_{BS,Ti} \cdot \\ \cdot \left(0.63 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{fast})T}}{\lambda_{Ti} + \lambda_{fast}} + 0.37 \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{Ti} + \lambda_{slow})T}}{\lambda_{Ti} + \lambda_{slow}} \right)$$

A.5.9.6 Dosis aus Ingestion

Mutter

Pflanzliche Produkte

Ingestionsdauer T = 1 Tag:

für eine Abgabe während der Ernteperiode

$$E_{ing,M,PP} = U_{PP} \cdot e_{ing,M} \cdot \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{PP}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,M}T}}{\lambda_{e,BI,M}}$$

für eine Abgabe ausserhalb der Ernteperiode

$$E_{ing,M,PP} = 0$$

Ingestionsdauer $T = 1$ resp 50 Jahre ($T^* = \text{Min}[T_{PP}; T_P]$; $T' = \text{Max}[T_P - T_1/2; 0]$):

für $T^* \geq T'$; grau hinterlegter Term nur, wenn $T > T_P + T_1/2$:

$$E_{ing,M,PP} = U_{PP} \cdot e_{ing,M} \cdot \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{PP}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{e,BI,M} T'} - e^{-\lambda_{e,BI,M} T^*}}{\lambda_{e,BI,M}} + e^{-\lambda_M \cdot T_P} \cdot \frac{2}{T_1 \cdot \lambda_{V,M}} \cdot \left[e^{-\lambda_{V,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{V,M} \cdot T^*} \right] \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_M \cdot T_1/2}}{\lambda_M} \right) + U_{PP,E} \cdot e_{ing,M,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{PP}} \cdot TF_{Bo-PP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}}$$

für $T^* < T'$:

$$E_{ing,M,PP} = U_{PP,E} \cdot e_{ing,M,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{PP}} \cdot TF_{Bo-PP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}}$$

Milch und Milchprodukte

Ingestionsdauer $T = 1$ Tag:

für Ernteperiode

$$E_{ing,M,Mi} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Mi,M} \cdot e^{-\lambda_M \cdot T_{Mi}} \cdot U_{Mi} \cdot e_{ing,M} \cdot \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,M} T}}{\lambda_{e,BI,M}}$$

sonst

$$E_{ing,M,Mi} = 0$$

Ingestionsdauer $T = 1$ resp 50 Jahre ($T^* = \text{Min}[T_{FP}; T_P]$; $T' = \text{Max}[T_P - T_1/2; 0]$):

für $T^* \geq T'$; grau hinterlegter Term nur, wenn $T > T_P + T_1/2$:

$$E_{ing,M,Mi} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Mi,M} \cdot e^{-\lambda_M \cdot T_{Mi}} \cdot \left[U_{Mi} \cdot e_{ing,M} \cdot \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{e,BI,M} T'} - e^{-\lambda_{e,BI,M} T^*}}{\lambda_{e,BI,M}} + e^{-\lambda_M \cdot T_P} \cdot \frac{2}{T_1 \cdot \lambda_{V,M}} \cdot \left[e^{-\lambda_{V,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{V,M} \cdot T^*} \right] \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_M \cdot T_1/2}}{\lambda_M} \right) + U_{Mi,E} \cdot e_{ing,M,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{FP}} \cdot TF_{Bo-FP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} \right]$$

für $T^* < T'$:

$$E_{ing,M,Mi} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Mi,M} \cdot e^{-\lambda_M \cdot T_{Mi}} \cdot U_{Mi,E} \cdot e_{ing,M,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{FP}} \cdot TF_{Bo-FP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_p - T_1 / 2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}}$$

Fleisch und Fleischprodukte

Ingestionsdauer $T = 1$ Tag:

für Ernteperiode

$$E_{ing,M,Fl} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Fl,M} \cdot e^{-\lambda_M \cdot T_{Fl}} \cdot U_{Fl} \cdot e_{ing,M} \cdot \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bl,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bl,M}}$$

sonst

$$E_{ing,M,Fl} = 0$$

Ingestionsdauer $T = 1$ resp 50 Jahre ($T^* = \text{Min}[T_{FP}; T_p]$; $T' = \text{Max}[T_p - T_1 / 2; 0]$):

für $T^* \geq T'$; grau hinterlegter Term nur, wenn $T > T_p + T_1 / 2$:

$$E_{ing,M,Fl} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Fl,M} \cdot e^{-\lambda_M \cdot T_{Fl}} \cdot \left[U_{Fl} \cdot e_{ing,M} \cdot \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{e,Bl,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,Bl,M} \cdot T^*}}{\lambda_{e,Bl,M}} + e^{-\lambda_M \cdot T_p} \cdot \frac{2}{T_1 \cdot \lambda_{V,M}} \cdot \left[e^{-\lambda_{V,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{V,M} \cdot T^*} \right] \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_M \cdot T_1 / 2}}{\lambda_M} \right) + U_{Fl,E} \cdot e_{ing,M,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{FP}} \cdot TF_{Bo-FP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_p + T_1 / 2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} \right]$$

für $T^* < T'$

$$E_{ing,M,Fl} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Fl,M} \cdot e^{-\lambda_M \cdot T_{Fl}} \cdot U_{Fl,E} \cdot e_{ing,M,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{FP}} \cdot TF_{Bo-FP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_p - T_1 / 2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}}$$

Tochter i

Pflanzliche Produkte

Ingestionsdauer $T = 1$ Tag:

$$E_{ing,Ti,PP} = U_{PP} \cdot e_{ing,Ti} \cdot \left[\frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,Bl,Ti} - \lambda_{e,Bl,M}} \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bl,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bl,M}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bl,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,Bl,Ti}} \right) + \right]$$

für eine Abgabe während der Ernteperiode

$$\left[\frac{Q \cdot \xi'_{K,Ti}}{Y_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} T}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right]$$

für eine Abgabe ausserhalb der Ernteperiode

$$E_{ing,Ti,PP} = 0$$

Ingestionsdauer $T = 1$ resp 50 Jahre ($T^* = \text{Min}[T_{PP}; T_P]$; $T' = \text{Max}[T_P - T_1/2; 0]$):

für $T^* \geq T'$; grau hinterlegter Term nur, wenn $T > T_P + T_1/2$:

$$E_{ing,Ti,PP} = U_{PP} \cdot e_{ing,Ti} \cdot \left[\frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,BI,Ti} - \lambda_{e,BI,M}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{e,BI,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,BI,M} \cdot T^*}}{\lambda_{e,BI,M}} - \frac{e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T^*}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right) \right. \\ \left. + \frac{Q \cdot \xi'_{K,Ti}}{Y_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T^*}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right] \\ + \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{2}{T_1 \cdot \lambda_{V,M}} \cdot \left(e^{-\lambda_{V,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{V,M} \cdot T^*} \right) \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_M \cdot T_P} - e^{-\lambda_M \cdot (T_P + T_1/2)}}{\lambda_M} - \frac{e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_P} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot (T_P + T_1/2)}}{\lambda_{Ti}} \right) \\ + U_{PP,E} \cdot e_{ing,Ti,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \\ \cdot \left[TF_{Bo-PP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} - TF_{Bo-PP,Ti} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,Ti}} \right] \\ + \frac{TF_{Bo-PP,Ti} - TF_{Bo-PP,M}}{T_{PP}} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}) \cdot T_{PP}}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} \right]$$

für $T^* < T'$:

$$E_{ing,Ti,PP} = U_{PP,E} \cdot e_{ing,Ti,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{PP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \\ \cdot \left[TF_{Bo-PP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} - TF_{Bo-PP,Ti} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,Ti}} \right] \\ + \frac{TF_{Bo-PP,Ti} - TF_{Bo-PP,M}}{T_{PP}} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}) \cdot T_{PP}}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} \right]$$

Milch und Milchprodukte

Ingestionsdauer $T = 1$ Tag:

Ernteperiode

$$E_{ing,Ti,Mi} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Mi,Ti} \cdot e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Mi}} \cdot U_{Mi} \cdot e_{ing,Ti} \cdot \left[\frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,BI,Ti} - \lambda_{e,BI,M}} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,M} \cdot T}}{\lambda_{e,BI,M}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right) \right. \\ \left. + \frac{Q \cdot \xi'_{K,Ti}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right] \\ + E_{ing,M,Mi} \cdot e^{\lambda_M \cdot T_{Mi}} \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot (e^{-\lambda_M \cdot T_{Mi}} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Mi}}) \cdot \frac{e_{ing,Ti,E}}{e_{ing,M,E}}$$

sonst

$$E_{ing,Ti,Mi} = 0$$

Ingestionsdauer $T = 1$ resp 50 Jahre ($T^* = \text{Min}[T_{FP}; T_P]$; $T' = \text{Max}[T_P - T_1/2; 0]$):

für $T \geq T'$; grau hinterlegter Term nur, wenn $T > T_P + T_1/2$:

$$\begin{aligned}
 E_{ing, Ti, Mi} = & V_{FP} \cdot TF_{FP-Mi, Ti} \cdot e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Mi}} \cdot \left\{ U_{Mi} \cdot e_{ing, Ti} \cdot \right. \\
 & \cdot \left[\frac{Q \cdot \xi'_{K, M}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e, Bl, Ti} - \lambda_{e, Bl, M}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{e, Bl, M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e, Bl, M} \cdot T^*}}{\lambda_{e, Bl, M}} - \frac{e^{-\lambda_{e, Bl, Ti} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e, Bl, Ti} \cdot T^*}}{\lambda_{e, Bl, Ti}} \right) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{Q \cdot \xi'_{K, Ti}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bl, Ti} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e, Bl, Ti} \cdot T^*}}{\lambda_{e, Bl, Ti}} \right] + \\
 & \left. \frac{Q \cdot \xi'_{K, M}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{2}{T_1 \cdot \lambda_{V, M}} \cdot \left(e^{-\lambda_{V, M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{V, M} \cdot T^*} \right) \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_M \cdot T_P} - e^{-\lambda_M \cdot (T_P + T_1/2)}}{\lambda_M} - \frac{e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_P} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot (T_P + T_1/2)}}{\lambda_{Ti}} \right) \right] \\
 & + U_{Mi, E} \cdot e_{ing, Ti, E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K, M}}{P_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e, Bo, Ti} - \lambda_{e, Bo, M}} \cdot \\
 & \cdot \left[TF_{Bo-FP, M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot T}}{\lambda_{e, Bo, M}} - TF_{Bo-FP, Ti} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bo, Ti} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e, Bo, Ti} \cdot T}}{\lambda_{e, Bo, Ti}} \right. \\
 & \left. + \frac{TF_{Bo-FP, Ti} - TF_{Bo-FP, M}}{T_{FP}} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{e, Bo, Ti} - \lambda_{e, Bo, M}) \cdot T_{FP}}}{\lambda_{e, Bo, Ti} - \lambda_{e, Bo, M}} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot T}}{\lambda_{e, Bo, M}} \right] \\
 & + E_{ing, M, Mi} \cdot e^{\lambda_M \cdot T_{Mi}} \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(e^{-\lambda_M \cdot T_{Mi}} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Mi}} \right) \cdot \frac{e_{ing, Ti, E}}{e_{ing, M, E}}
 \end{aligned}$$

für $T^* < T'$:

$$\begin{aligned}
 E_{ing, Ti, Mi} = & V_{FP} \cdot TF_{FP-Mi, Ti} \cdot e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Mi}} \cdot U_{Mi, E} \cdot e_{ing, Ti, E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K, M}}{P_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e, Bo, Ti} - \lambda_{e, Bo, M}} \cdot \\
 & \cdot \left[TF_{Bo-FP, M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot T}}{\lambda_{e, Bo, M}} - TF_{Bo-FP, Ti} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bo, Ti} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e, Bo, Ti} \cdot T}}{\lambda_{e, Bo, Ti}} \right. \\
 & \left. + \frac{TF_{Bo-FP, Ti} - TF_{Bo-FP, M}}{T_{FP}} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{e, Bo, Ti} - \lambda_{e, Bo, M}) \cdot T_{FP}}}{\lambda_{e, Bo, Ti} - \lambda_{e, Bo, M}} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e, Bo, M} \cdot T}}{\lambda_{e, Bo, M}} \right] \\
 & + E_{ing, M, Mi} \cdot e^{\lambda_M \cdot T_{Mi}} \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(e^{-\lambda_M \cdot T_{Mi}} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Mi}} \right) \cdot \frac{e_{ing, Ti, E}}{e_{ing, M, E}}
 \end{aligned}$$

Fleisch und Fleischprodukte

Ingestionsdauer $T = 1$ Tag:

Ernteperiode

$$E_{ing,Ti,Fl} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Fl,Ti} \cdot e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Fl}} \cdot U_{Fl} \cdot e_{ing,Ti} \cdot \left[\frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,BI,Ti} - \lambda_{e,BI,M}} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,M} \cdot T}}{\lambda_{e,BI,M}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right) \right. \\ \left. + \frac{Q \cdot \xi'_{K,Ti}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right] \\ + E_{ing,M,Fl} \cdot e^{\lambda_M \cdot T_{Fl}} \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot (e^{-\lambda_M \cdot T_{Fl}} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Fl}}) \cdot \frac{e_{ing,Ti,E}}{e_{ing,M,E}}$$

sonst

$$E_{ing,Ti,Fl} = 0$$

Ingestionsdauer $T = 1$ resp 50 Jahre ($T^* = \text{Min}[T_{FP}; T_P]$; $T' = \text{Max}[T_P - T_1/2; 0]$):

für $T \geq T'$; grau hinterlegter Term nur, wenn $T > T_P + T_1/2$:

$$E_{ing,Ti,Fl} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Fl,Ti} \cdot e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Fl}} \cdot \left\{ U_{Fl} \cdot e_{ing,Ti} \cdot \left[\frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,BI,Ti} - \lambda_{e,BI,M}} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_{e,BI,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,BI,M} \cdot T^*}}{\lambda_{e,BI,M}} - \frac{e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T^*}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right) + \frac{Q \cdot \xi'_{K,Ti}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T'} - e^{-\lambda_{e,BI,Ti} \cdot T^*}}{\lambda_{e,BI,Ti}} \right] + \frac{Q \cdot \xi'_{K,M}}{Y_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{2}{T_1 \cdot \lambda_{V,M}} \cdot \left(e^{-\lambda_{V,M} \cdot T'} - e^{-\lambda_{V,M} \cdot T^*} \right) \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_M \cdot T_P} - e^{-\lambda_M \cdot (T_P + T_1/2)}}{\lambda_M} - \frac{e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_P} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot (T_P + T_1/2)}}{\lambda_{Ti}} \right) + U_{Fl,E} \cdot e_{ing,Ti,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \left[TF_{Bo-FP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} - TF_{Bo-FP,Ti} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,Ti}} + \frac{TF_{Bo-FP,Ti} - TF_{Bo-FP,M}}{T_{FP}} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}) \cdot T_{FP}}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P + T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} \right] + E_{ing,M,Fl} \cdot e^{\lambda_M \cdot T_{Fl}} \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(e^{-\lambda_M \cdot T_{Fl}} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Fl}} \right) \cdot \frac{e_{ing,Ti,E}}{e_{ing,M,E}} \right\}$$

für $T^* < T'$:

$$E_{ing,Ti,Fl} = V_{FP} \cdot TF_{FP-Fl,Ti} \cdot e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Fl}} \cdot U_{Fl,E} \cdot e_{ing,Ti,E} \cdot \frac{Q \cdot \xi_{K,M}}{P_{FP}} \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \left[TF_{Bo-FP,M} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} - TF_{Bo-FP,Ti} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,Ti} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,Ti}} + \frac{TF_{Bo-FP,Ti} - TF_{Bo-FP,M}}{T_{FP}} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}) \cdot T_{FP}}}{\lambda_{e,Bo,Ti} - \lambda_{e,Bo,M}} \cdot \frac{e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot (T_P - T_1/2)} - e^{-\lambda_{e,Bo,M} \cdot T}}{\lambda_{e,Bo,M}} \right] + E_{ing,M,Fl} \cdot e^{\lambda_M \cdot T_{Fl}} \cdot \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{Ti} - \lambda_M} \cdot \left(e^{-\lambda_M \cdot T_{Fl}} - e^{-\lambda_{Ti} \cdot T_{Fl}} \right) \cdot \frac{e_{ing,Ti,E}}{e_{ing,M,E}}$$

A.5.9.7 Bedeutung der Symbole

Im Folgenden sind die Symbole gelistet, die in dieser Zusammenfassung erscheinen (Index M für Mutter und Ti für Tochter i). Die Symbole sind identisch mit denen der vorherigen Anhänge. Einzige Ausnahme ist λ_M , das hier als radioaktive Zerfallskonstante der Mutter und in den vorherigen Anhängen als nicht radioaktiver Anteil der Abreicherung aus dem Wurzelbereich (was hier λ_W genannt ist) verwendet wird.

Symbol	Bedeutung	Einheiten
$A_{Bo,M}, A_{Bo,Ti}$	Abgelagerte Aktivität auf Boden	Bq/m ²
$C_{Lu,M}, C_{Lu,Ti}$	Konzentration in der Luft	Bq/m ³
$E_{BS,M}, E_{BS,Ti}$	Dosis durch Bodenstrahlung	Sv
$E_{ing,M}, E_{ing,Ti}$	totale Ingestionsdosis (Luftpfad)	Sv
$E_{inh,M}, E_{inh,Ti}$	Inhalationsdosis	Sv
$E_{imm,M}, E_{imm,Ti}$	Immersionsdosis	Sv
$e_{BS,M}, e_{BS,Ti}$	Bodenstrahlungsdosis(raten)faktor	Sv·m ² /Bq/Jahr
$e_{ing,M}, e_{ing,Ti}$	Ingestionsdosisfaktor (Index E für Erwachsenen)	Sv/Bq
$e_{inh,M}, e_{inh,Ti}$	Inhalationsdosisfaktor	Sv/Bq
$e_{imm,M}, e_{imm,Ti}$	Immersionsdosis(raten)faktor	Sv·m ³ /Bq/Jahr
K_s	Abschirmung für partiellen Aufenthalt im Haus	-
P_{Pfl} P_{PP} P_{FP}	Bodenmasse des Wurzelbereiches - Gemüse und Obst - Futterpflanzen	kg/m ²
\dot{Q}	Abgaberate	Bq/s
Q	Gesamtabgabe (im Zeitraum)	Bq
T	Expositionszeit	Jahre
T_1	Integrationszeitraum	Jahre
T_P	Zeit zwischen einem Ereignis und dem Ende der nächsten Ernteperiode	Jahre
T_{fz}	Flugzeit bis zum Aufschlagpunkt	Jahre
T_{Fi}	Verarbeitungszeit für Fisch	Jahre
T_{Fl}	Verarbeitungszeit für Fleisch	Jahre
T_{Mi}	Verarbeitungszeit für Milch	Jahre
T_{Pfl} T_{PP} T_{FP}	Wachstumszeit von Pflanzen: - Gemüse/Obst - Futterpflanzen und Lagerfutter	Jahre
T	Zeit seit der Abgabe	Jahre
$TF_{Bo-Pfl,M}, TF_{Bo-Pfl,Ti}$ $TF_{Bo-PP,M}, TF_{Bo-PP,Ti}$ $TF_{Bo-FP,M}, TF_{Bo-FP,Ti}$	Transferfaktor in die Pflanzen: Boden-Gemüse/Obst Boden-Futterpflanzen	Bq/kg/(Bq/kg)
$TF_{FP-Mi,M}, TF_{FP-Mi,Ti}$	Transferfaktor Futter-Milch	Tage/kg
$TF_{FP-Fl,M}, TF_{FP-Fl,Ti}$	Transferfaktor Futter-Fleisch	Tage/kg
V_{FP}	Futtermenge für Kühe und Rinder	kg/Tag

Symbol	Bedeutung	Einheiten
Y_{Pfl}	Bewuchsdichte für Pflanzen:	kg/m ²
Y_{PP}	- Gemüse/Obst (pflanzl. Produkte)	
Y_{FP}	- Futterpflanzen	
λ_M, λ_{Ti}	radioaktive Zerfallskonstante	Jahr ⁻¹
λ_{slow}	nicht radioaktiver, langsamer Anteil der Abreicherung für Bodenstrlg.	Jahr ⁻¹
λ_{fast}	nicht radioaktiver, rascher Anteil der Abreicherung für Bodenstrlg.	Jahr ⁻¹
$\lambda_{e,BI,M}, \lambda_{e,BI,Ti}$	totale Abreicherungskonstante von Radionukliden auf Pflanzen $\lambda_{e,BI,M} = \lambda_M + \lambda_{V,M}, \lambda_{e,BI,Ti} = \lambda_{Ti} + \lambda_{V,Ti}$	Jahr ⁻¹
$\lambda_{e,Bo,M}, \lambda_{e,Bo,Ti}$	totale Abreicherungskonstante von Radionukliden im Wurzelbereich $\lambda_{e,Bo,M} = \lambda_M + \lambda_{W,M}, \lambda_{e,Bo,Ti} = \lambda_{Ti} + \lambda_{W,Ti}$	Jahr ⁻¹
$\lambda_{V,M}, \lambda_{V,Ti}$	nicht radioaktive Abreicherungskonstante auf Pflanzen	Jahr ⁻¹
$\lambda_{W,M}, \lambda_{W,Ti}$	nicht radioaktiver Anteil der Abreicherung aus dem Wurzelbereich	Jahr ⁻¹
$\xi_{K,M}, \xi_{K,Ti}$	totaler Ablagerungsfaktor (Boden)	m ⁻²
$\xi'_{K,M}, \xi'_{K,Ti}$	totaler Ablagerungsfaktor (Blätter)	m ⁻²
χ	Ausbreitungsfaktoren	s/m ³
χ_s	Submersions-Ausbreitungsfaktoren	s/m ³

A.5.10 Berücksichtigung von Tochterprodukten - Langzeitabgaben

Bemerkungen

Für $T_{HWZ,Ti} < 10$ Min. wird die Tochter über eine Anpassung der Dosisfaktoren berücksichtigt.

Im Gleichgewicht vor der Abgabe gilt $A_{Ti} = f_i \cdot A_M$ (f_i ist der Branching-Anteil, der in die jeweilige Tochter geht).

Nach der Aufhebung des erzwungenen Gleichgewichts (Dies wird bei der Abgabe zum Abgabzeitpunkt $t=0$ angenommen!) gilt:

$$A_M(t) = A_M \cdot e^{-\lambda_{eff,1} \cdot t}$$

mit $A_M = A_1(0)$, $\lambda_{eff,1}$ totale effektive Zerfallskonstante

$$A_{Ti}(t) = f_i \cdot A_M \cdot \left[e^{-\lambda_{eff,2} \cdot t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_{eff,2} - \lambda_{eff,1}} \cdot \{ e^{-\lambda_{eff,1} \cdot t} - e^{-\lambda_{eff,2} \cdot t} \} \right]$$

Für Edelgase darf der 1. Term in der eckigen Klammer der 2. Gleichung 0 gesetzt werden, falls die Töchter bei der Abgabe zurückgehalten werden. Ebenfalls 0 gesetzt werden kann dieser Term für aerosolförmige Tochterprodukte, die aufgrund ihrer Halbwertszeit (Anmerkung: bei KKW gemäss Abgabereglement bei einer Halbwertszeit von mehr als 8 Tagen)

separat bilanziert werden. Der entsprechende Term ist in den folgenden Formeln jeweils grau hinterlegt.

A.5.10.1 Immersion und Inhalation

Es gilt: $\lambda_{\text{eff},1} = \lambda_1$ und $\lambda_{\text{eff},2} = \lambda_2$

Somit ergeben sich mit einer Flugzeit T_{fz} die Luftkonzentrationen:

$$C_{\text{Luft},2} = f_i \cdot \dot{Q} \cdot \chi \cdot [e^{-\lambda_2 \cdot T_{\text{fz}}} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{ e^{-\lambda_1 \cdot T_{\text{fz}}} - e^{-\lambda_2 \cdot T_{\text{fz}}} \}]$$

A.5.10.2 Bodenstrahlung

$$A_{\text{Bo},2}(t) = A_{\text{Bo},2}(0) \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} + f_i \cdot A_{\text{Bo},1}(0) \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{ e^{-\lambda_1 \cdot t} - e^{-\lambda_2 \cdot t} \} \\ + f_i \cdot \dot{Q} \cdot \xi_L \cdot \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\lambda_1 \cdot t})}{\lambda_1} - \frac{(1 - e^{-\lambda_2 \cdot t})}{\lambda_2} \right] + \frac{(1 - e^{-\lambda_2 \cdot t})}{\lambda_2} \right\}$$

Durch Aufintegration über die Zeit T (1 Jahr) und Trennung in die Anteile „fast“ und „slow“ erhält man die Dosis durch Bodenstrahlung:

$$E_{\text{BS},2} = [A_{\text{Bo},2}(0) (1 - e^{-\lambda_2 \cdot T}) / \lambda_2 + f_i \cdot A_{\text{Bo},1}(0) \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{ (1 - e^{-\lambda_1 \cdot T}) / \lambda_1 - (1 - e^{-\lambda_2 \cdot T}) / \lambda_2 \}] \\ + f_i \cdot \dot{Q} \cdot \xi_L \cdot \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left[\frac{(T - \{1 - e^{-\lambda_1 \cdot T}\}) / \lambda_1}{\lambda_1} - \frac{(T - \{1 - e^{-\lambda_2 \cdot T}\}) / \lambda_2}{\lambda_2} \right] \right. \\ \left. + \frac{(T - \{1 - e^{-\lambda_2 \cdot T}\}) / \lambda_2}{\lambda_2} \right\} \cdot k_s \cdot e_{\text{BS},2}$$

$A_{\text{Bo},2}(0)$ errechnet sich durch Aufintegration über 50 Jahre:

$$A_{\text{Bo},2}(0) = f_i \cdot \dot{Q} \cdot \xi_L \cdot \left\{ \frac{0.63 \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_{\text{fast}}) \cdot 50})}{(\lambda_2 + \lambda_{\text{fast}})} + \frac{0.37 \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_{\text{slow}}) \cdot 50})}{(\lambda_2 + \lambda_{\text{slow}})} \right\} \\ + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left\{ 0.63 \cdot \left[\frac{(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_{\text{fast}}) \cdot 50})}{(\lambda_1 + \lambda_{\text{fast}})} - \frac{(1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_{\text{fast}}) \cdot 50})}{(\lambda_2 + \lambda_{\text{fast}})} \right] \right. \\ \left. + 0.37 \cdot \left[\frac{(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_{\text{slow}}) \cdot 50})}{(\lambda_1 + \lambda_{\text{slow}})} - \frac{(1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_{\text{slow}}) \cdot 50})}{(\lambda_2 + \lambda_{\text{slow}})} \right] \right\}$$

oder aber iterativ aus $A_{Bo,2}(0) = A_{Bo,fast,2}(0) + A_{Bo,slow,2}(0)$ mit

$$A_{Bo,fast,2}(0) = A_{Bo,fast,2}(-1) \cdot e^{-(\lambda_2+\lambda_{fast}) \cdot 1} + f_i \cdot A_{Bo,fast,1}(-1) \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{e^{-(\lambda_1+\lambda_{fast}) \cdot 1} - e^{-(\lambda_2+\lambda_{fast}) \cdot 1}\} \\ + f_i \cdot \dot{Q}(-1) \cdot \xi_L \cdot \{0.63 \cdot (1 - e^{-(\lambda_2+\lambda_{fast}) \cdot 1}) / (\lambda_2 + \lambda_{fast})\} \\ + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot 0.63 \cdot [(1 - e^{-(\lambda_1+\lambda_{fast}) \cdot 1}) / (\lambda_1 + \lambda_{fast}) - (1 - e^{-(\lambda_2+\lambda_{fast}) \cdot 1}) / (\lambda_2 + \lambda_{fast})]$$

$$A_{Bo,slow,2}(0) = A_{Bo,slow,2}(-1) \cdot e^{-(\lambda_2+\lambda_{slow}) \cdot 1} + f_i \cdot A_{Bo,slow,1}(-1) \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \{e^{-(\lambda_1+\lambda_{slow}) \cdot 1} - e^{-(\lambda_2+\lambda_{slow}) \cdot 1}\} \\ + f_i \cdot \dot{Q}(-1) \cdot \xi_L \cdot \{0.37 \cdot (1 - e^{-(\lambda_2+\lambda_{slow}) \cdot 1}) / (\lambda_2 + \lambda_{slow})\} \\ + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot 0.37 \cdot [(1 - e^{-(\lambda_1+\lambda_{slow}) \cdot 1}) / (\lambda_1 + \lambda_{slow}) - (1 - e^{-(\lambda_2+\lambda_{slow}) \cdot 1}) / (\lambda_2 + \lambda_{slow})]$$

A.5.10.3. Ingestion

Direkte Blattablagerung und Lagerprodukte (es sei $C_{Pfl,BI}^0 = \dot{Q} \cdot \xi'_L / Y_{Pfl}$):

Für die zeitabhängige Konzentration der Tochter $C_{Pfl,BI,2}(t)$ aus direkter Blattablagerung gilt:

$$C_{Pfl,BI,2}(t) = C_{Pfl,BI}^0 \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1/\lambda_{e,BI,1} - 1/\lambda_{e,BI,2}) + 1/\lambda_{e,BI,2} \right]$$

Für die zeitabhängige Konzentration in Lagerpflanzen (Blattablagerung) $C_{Pfl,L,2}(t)$ gilt:

$$C_{Pfl,L,2}(t) = C_{Pfl,BI}^0 \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot [1/\lambda_{e,BI,1} \cdot \{1 - e^{-\lambda_1 \cdot t}\} / (\lambda_1/2) \cdot e^{-\lambda_1 \cdot (t - [TE+1/2])}] \right. \\ \left. - 1/\lambda_{e,BI,2} \cdot \{1 - e^{-\lambda_2 \cdot t}\} / (\lambda_2/2) \cdot e^{-\lambda_2 \cdot (t - [TE+1/2])}] \right] \\ + 1/\lambda_{e,BI,2} \cdot \{1 - e^{-\lambda_2 \cdot t}\} / (\lambda_2/2) \cdot e^{-\lambda_2 \cdot (t - [TE+1/2])}]$$

Für die Wurzel gilt für die direkte Aufnahme der Tochter aus dem Boden:

$$C_{Pfl,W,2}(t) = C_{Pfl,W,2}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot t} + C_{Pfl,W,(1,2)}^0 \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_{e,Bo,2} - \lambda_{e,Bo,1}} \cdot [e^{-\lambda_{e,Bo,1} \cdot t} - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot t}]$$

$C_{Pfl,W,2}^0$ berechnet sich nach der Formel $C_{Pfl,W,2}^0 = C_{Bo,2}(0) \cdot TF_{Bo-Pfl,2}$

Der zweite Term in der obigen Formel stellt den Aktivitätsaufbau der Tochter aus der Bodenaktivität $C_{Bo,1}(0)$ dar; in diesem Fall ist nicht klar, ob der Transferfaktor der Mutter oder der Tochter für die Beschreibung des Wurzeltransfers anzuwenden ist. Konservativ wird hier das Maximum der beiden Transferfaktoren nach der folgenden Formel verwendet:

$$C_{Pfl,W,(1,2)}^0 = C_{Bo,1}(0) \cdot \text{Max}(TF_{Bo-Pfl,1}; TF_{Bo-Pfl,2})$$

Die Nuklidkonzentration der Tochter im Boden zu Beginn des jeweiligen Jahres erhält man entweder durch Integration über 50 Jahre als:

$$C_{Bo,2}(0) = \mathcal{Q} \cdot \xi_L / P_{Pfl} \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_{e,Bo,2} - \lambda_{e,Bo,1}} \cdot \left[\frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,1} \cdot 50}}{\lambda_{e,Bo,1}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 50}}{\lambda_{e,Bo,2}} \right] + \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 50}}{\lambda_{e,Bo,2}} \right]$$

resp. iterativ als

$$C_{Bo,2}(0) = C_{Bo,2}(-1) \cdot e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 1} + C_{Bo,1}(-1) \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_{e,Bo,2} - \lambda_{e,Bo,1}} \cdot [e^{-\lambda_{e,Bo,1} \cdot 1} - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 1}] + \mathcal{Q} \cdot \xi_L / P_{Pfl} \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_{e,Bo,2} - \lambda_{e,Bo,1}} \cdot \left[\frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,1} \cdot 1}}{\lambda_{e,Bo,1}} - \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 1}}{\lambda_{e,Bo,2}} \right] + \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 1}}{\lambda_{e,Bo,2}} \right]$$

Mit diesen Konzentrationen erhält man durch zeitliche Aufintegration über das laufende Jahr die folgenden Dosisbeiträge durch die Tochterprodukte:

Pflanzliche Produkte

$$E_{ing,PP,2} = U_{PP} \cdot e_{ing} \cdot \left\{ C_{PP,BI}^0 \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{e,BI,1}} - \frac{1}{\lambda_{e,BI,2}} \right) + \frac{1}{\lambda_{e,BI,2}} \right] \cdot \frac{1}{2} + \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left[\frac{1}{\lambda_{e,BI,1}} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_1/2}}{\lambda_1} \right)^2 - \frac{1}{\lambda_{e,BI,2}} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2/2}}{\lambda_2} \right)^2 + \frac{1}{\lambda_{e,BI,2}} \cdot 2 \cdot \left(\frac{1 - e^{-\lambda_2/2}}{\lambda_2} \right)^2 \right] \right] + (C_{PP,W,2}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot T_E} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 1}}{\lambda_{e,Bo,2}} + C_{PP,W,(1;2)}^0 \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_{e,Bo,2} - \lambda_{e,Bo,1}} \cdot \left[e^{-\lambda_{e,Bo,1} \cdot T_E} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,1} \cdot 1}}{\lambda_{e,Bo,1}} - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot T_E} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{e,Bo,2} \cdot 1}}{\lambda_{e,Bo,2}} \right] \right\}$$

Milch und Milchprodukte

$$\begin{aligned}
 E_{\text{ing,Mi,2}} = & V_{\text{FP}} \cdot U_{\text{Mi}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot \{ C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1/\lambda_{e,\text{BI},1} - 1/\lambda_{e,\text{BI},2}) + 1/\lambda_{e,\text{BI},2} \right] \cdot \frac{1}{2} \\
 & + C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot [1/\lambda_{e,\text{BI},1} \cdot 2 \cdot \{1 - e^{-\lambda_1/2}\}/\lambda_1]^2 - 1/\lambda_{e,\text{BI},2} \cdot 2 \cdot \{1 - e^{-\lambda_2/2}\}/\lambda_2 \right]^2 \\
 & + 1/\lambda_{e,\text{BI},2} \cdot 2 \cdot \{1 - e^{-\lambda_2/2}\}/\lambda_2 \cdot \text{TF}_{\text{FP-Mi,2}} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot T_{\text{Mi}}} \\
 & + C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot f_i \cdot [1/\lambda_{e,\text{BI},1} \cdot \frac{1}{2} + [1/\lambda_{e,\text{BI},1} \cdot 2 \cdot \{1 - e^{-\lambda_1/2}\}/\lambda_1]^2] \\
 & \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \text{TF}_{\text{FP-Mi,1}} \cdot [e^{-\lambda_1 \cdot T_{\text{Mi}}} - e^{-\lambda_2 \cdot T_{\text{Mi}}}] \\
 & + (C_{\text{Pfl,W,2}}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot T_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot 1}\}/\lambda_{e,\text{Bo},2} \\
 & + C_{\text{Pfl,W,(1,2)}}^0 \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_{e,\text{Bo},2} - \lambda_{e,\text{Bo},1}} \cdot [e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot T_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot 1}\}/\lambda_{e,\text{Bo},1} \\
 & - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot T_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot 1}\}/\lambda_{e,\text{Bo},2}] \cdot \text{TF}_{\text{FP-Mi,2}} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot T_{\text{Mi}}} \\
 & + C_{\text{Pfl,W,1}}^0 \cdot f_i \cdot [e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot T_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot 1}\}/\lambda_{e,\text{Bo},1} \\
 & \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \text{TF}_{\text{FP-Mi,1}} \cdot [e^{-\lambda_1 \cdot T_{\text{Mi}}} - e^{-\lambda_2 \cdot T_{\text{Mi}}}] \}
 \end{aligned}$$

Fleisch und Fleischprodukte

$$\begin{aligned}
 E_{\text{ing,FI},2} = & V_{\text{FP}} \cdot U_{\text{FI}} \cdot e_{\text{ing}} \cdot \left\{ C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot f_i \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1/\lambda_{e,\text{BI},1} - 1/\lambda_{e,\text{BI},2}) + 1/\lambda_{e,\text{BI},2} \right) \cdot \frac{1}{2} \right. \\
 & + C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot f_i \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot [1/\lambda_{e,\text{BI},1} \cdot 2 \cdot \{(1 - e^{-\lambda_1/2})/\lambda_1\}^2 - 1/\lambda_{e,\text{BI},2} \cdot 2 \cdot \{(1 - e^{-\lambda_2/2})/\lambda_2\}^2] \right. \\
 & \quad \left. \left. + 1/\lambda_{e,\text{BI},2} \cdot 2 \cdot \{(1 - e^{-\lambda_2/2})/\lambda_2\}^2 \right] \cdot \text{TF}_{\text{FP-FI},2} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot \text{T}_{\text{FI}}} \right. \\
 & + C_{\text{FP,BI}}^0 \cdot f_i \cdot [1/\lambda_{e,\text{BI},1} \cdot \frac{1}{2} + [1/\lambda_{e,\text{BI},1} \cdot 2 \cdot \{(1 - e^{-\lambda_1/2})/\lambda_1\}^2]] \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \text{TF}_{\text{FP-FI},1} \cdot [e^{-\lambda_1 \cdot \text{T}_{\text{FI}}} - e^{-\lambda_2 \cdot \text{T}_{\text{FI}}}] \\
 & \quad + (C_{\text{Pfl,W},2}^0 \cdot e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot \text{T}_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot 1}\} / \lambda_{e,\text{Bo},2} \\
 & + C_{\text{Pfl,W,(1;2)}}^0 \cdot f_i \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_{e,\text{Bo},2} - \lambda_{e,\text{Bo},1}} \cdot [e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot \text{T}_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot 1}\} / \lambda_{e,\text{Bo},1} \\
 & \quad - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot \text{T}_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},2} \cdot 1}\} / \lambda_{e,\text{Bo},2}] \cdot \text{TF}_{\text{FP-FI},2} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot \text{T}_{\text{FI}}} \\
 & \quad + C_{\text{Pfl,W},1}^0 \cdot f_i \cdot [e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot \text{T}_{\text{E}}} \cdot \{1 - e^{-\lambda_{e,\text{Bo},1} \cdot 1}\} / \lambda_{e,\text{Bo},1}] \\
 & \quad \left. \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \text{TF}_{\text{FP-FI},1} \cdot [e^{-\lambda_1 \cdot \text{T}_{\text{FI}}} - e^{-\lambda_2 \cdot \text{T}_{\text{FI}}}] \right\}
 \end{aligned}$$

Anhang 6: Einheiten und Zahlenwerte

Einheiten und Zahlenwerte nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Deutschen Strahlenschutzverordnung

Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheiten
\dot{A}	Ablagerungsrate	Bq/(m ² Jahr)
A(t)	Abgelagerte Aktivität auf Boden	Bq/m ²
A(0)	Abgelagerte Aktivität auf Boden zu Beginn des Jahres	Bq/m ²
C _{Bo} (t)	Konzentration im Wurzelbereich von Pflanzen	Bq/kg
C _{Bo} (0)	Konzentration im Wurzelbereich zu Beginn des Jahres	Bq/kg
C _{Pfl} (t): C _{PP} (t), C _{FP} (t)	zeitabhängige Konzentration in verbrauchsbereiten Pflanzen	Bq/kg
C ⁰ _{Pfl,Bl} : C ⁰ _{PP,Bl} C ⁰ _{FP,Bl}	Konzentration durch Ablagerung auf der Pflanzenoberfläche direkt nach einer Kurzzeitabgabe resp. während der Langzeitabgabe	Bq/kg
C ⁰ _{Pfl,W} : C ⁰ _{PP,W} C ⁰ _{FP,W}	Konzentration durch Wurzel Aufnahme direkt nach einer Kurzzeitabgabe resp. zu Beginn des Jahres für Langzeitabgaben	Bq/kg
E _{BS}	Dosis durch Bodenstrahlung	Sv
E _{ing}	totale Ingestionsdosis (Luftpfad)	Sv
E _{tot,HTO}	Ingestionsdosis durch Tritium	Sv
E _{ing,WP}	totale Ingestionsdosis (Wasserpfad)	Sv
E _{inh}	Inhalationsdosis	Sv
E _{imm}	Immersionsdosis	Sv
e _{BS}	Bodenstrahlungsdosis(raten)faktor	Sv·m ² /Bq/Jahr
e _{ing}	Ingestionsdosisfaktor	Sv/Bq
e _{inh}	Inhalationsdosisfaktor	Sv/Bq
e _{imm}	Immersionsdosis(raten)faktor	Sv·m ³ /Bq/Jahr
F, F _L , F _K	Falloutfaktoren	m ⁻²
f _d	Anteil der direkten feuchten Ablagerungen auf die Pflanzenoberflächen	
f _{ei}	Anteil von elementarem Iod an der Gesamtabgabe (Luftpfad)	
f _F	Wasseranteil in Milch und Fleisch aus der Tiernahrung	
f _i	Verzweigungsverhältnis in das Nuklid i (branching fraction)	
f _K	Kohlenstoff-Massenanteil in der Nahrung	
f _{Lu} f _N	Anteil des Wassers in Pflanzen aus - Luftfeuchtigkeit: - Niederschlägen:	
f _{Wa}	mittlerer Gewichtsanteil von Wasser in Nahrungsmitteln	
G _t	Anteil der luftgetragenen Abgaben, der aufgrund der Gebäudeeinträge als Bodenrelease angesetzt wird	

Symbol	Bedeutung	Einheiten
I_N	Niederschlagsintensität (für Limite) Niederschlagsmenge im Bezugsjahr	mm/h mm/Jahr
I_0	Bezugsniederschlagsintensität	mm/h
J	mittlere jährliche Abflussmenge des jeweiligen Flusses (Vorfluter)	m ³ /Jahr
K_0 K_e	Wiederaufwirblungs-Koeffizienten	m ⁻¹
k_c	Umrechnungsfaktor Sekunden-Jahr	s/Jahr
k_{mk}	Umrechnungsfaktor kg zu m ³ für Wasser	kg/m ³
k_N	Niederschlags-Umrechnungsfaktor	(kg/m ²)/mm
k_s	Abschirmung für partiellen Aufenthalt im Haus	
L	Immobilisierungskonst. am Boden	Jahr ⁻¹
$P_{Pfl.}$ P_{PP} P_{FP}	Bodenmasse des Wurzelbereiches - Gemüse und Obst - Futterpflanzen	kg/m ²
$p_y, p_z; q_y, q_z$	Vogt'sche Parameter	p_y, p_z : [m]; q_y, q_z : [-]
\dot{Q}	Abgaberate	Bq/Jahr
Q	Gesamtabgabe (im Zeitraum)	Bq
T	Expositionszeit	Jahre
T_1 resp. T_{50}	Integrationszeitraum	Jahre
T_E	Zeit zwischen Beginn des Kalenderjahres und Erntebeginn (16. April)	Jahre
T_P	Zeit zwischen einem Ereignis und dem Ende der nächsten Ernteperiode resp. Ernteperiode (Langzeitabgabe)	Jahre
T_{fz}	Flugzeit bis zum Aufschlagpunkt	Jahre
T_{Fi}	Verarbeitungszeit für Fisch	Jahre
T_{Fl}	Verarbeitungszeit für Fleisch	Jahre
T_{Mi}	Verarbeitungszeit für Milch	Jahre
$T_{Pfl.}$ T_{PP} T_{FP}	Wachstumszeit von Pflanzen: - Gemüse/Obst - Futterpflanzen und Lagerfutter	Jahre
t	Zeit seit Beginn des Kalenderjahres resp. Zeit seit der Abgabe	Jahre
$TF_{Bo-Pfl.}$ TF_{Bo-PP} TF_{Bo-FP}	Transferfaktor in die Pflanzen: Boden-Gemüse/Obst Boden-Futterpflanzen	(Bq/kg)/(Bq/kg)
TF_{FP-Mi}	Transferfaktor Futter-Milch	Tage/kg
TF_{FP-Fl}	Transferfaktor Futter-Fleisch	Tage/kg
TF_{Wa-Fi}	Transferfaktor Wasser-Fisch	m ³ /kg
V_{FP}	Futtermenge für Kühe und Rinder	kg/Tag
V_{TW}	Tränkemenge für Kühe und Rinder	m ³ /Tag
v_g	Ablagerungsgeschwindigkeit - Aerosole - elementares Iod	m/s
W_L, W_K	Washoutfaktor	m ⁻²

Symbol	Bedeutung	Einheiten
Y_{Pfl} : Y_{PP} Y_{FP}	Bewuchsdichte für Pflanzen: - Gemüse/Obst (pflanzliche Produkte) - Futterpflanzen	kg/m^2
κ	Korrekturkoeffizient für die Berechnung der Washoutfaktoren - Iod, Aerosole - Tritium	
Λ	Washoutkoeffizient	s^{-1}
Λ_0	Referenzwashoutkoeffizient für eine Niederschlagsintensität I_0 - elementares Iod, Aerosole - tritiiertes Wasser	s^{-1}
λ	radioaktive Zerfallskonstante	$Jahr^{-1}$
λ_{slow}	nicht radioaktiver, langsamer Anteil der Abreicherung für Bodenstrahlung	$Jahr^{-1}$
λ_{fast}	nicht radioaktiver, rascher Anteil der Abreicherung für Bodenstrahlung	$Jahr^{-1}$
$\lambda_{e,Bl}$	totale Abreicherungskonstante von Radionukliden auf Pflanzen	$Jahr^{-1}$
$\lambda_{e,Bo}$	totale Abreicherungskonstante von Radionukliden im Wurzelbereich	$Jahr^{-1}$
λ_W	nicht radioaktiver Anteil der Abreicherung aus dem Wurzelbereich	$Jahr^{-1}$
λ_V	nicht radioaktive Abreicherungskonstante auf Pflanzen für - Aerosole - Iod	$Jahr^{-1}$
ξ_L, ξ_K	totaler Ablagerungsfaktor (Boden)	m^{-2}
ξ'_L, ξ'_K	totaler Ablagerungsfaktor (Blätter)	m^{-2}
σ_y, σ_z	Gauss'sche Ausbreitungsparameter	m
Φ	mittlere absolute Luftfeuchtigkeit	kg/m^3
χ_L, χ_K	Ausbreitungsfaktoren	s/m^3
$\chi_{L,S}, \chi_{K,S}, \chi_S$	Submersions-Ausbreitungsfaktoren	s/m^3
$\chi_{K, alt}$	vorgängig verwendeter (alter) Ausbreitungsfaktor	s/m^3
Ψ	Kohlenstoffkonzentration in der Luft	kg/m^3

Zahlenwerte

Symbol	Bedeutung	Einheit	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr Langzeitabgabe	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr Kurzzeitabgabe	Auslegungs- störfälle
f _d	Anteil der direkten feuchten Ablagerungen auf die Pflanzenoberflächen		0.3 (Iod: 1.0) ¹⁾	0.3	0.3
f _{ei}	Anteil von elementarem Iod an der Gesamtabgabe (Luftpfad)		0.5	0.5	je nach Quellterm
f _F	Wasseranteil in Milch und Fleisch aus der Tiernahrung		0.4	0.4	0.4
f _k	Kohlenstoff-Massenanteil in der Nahrung		0.125	0.125	0.125
f _{Lu} f _N	Anteil des Wassers in Pflanzen aus - Luftfeuchtigkeit: - Niederschlägen:		0.3 (1.0) ²⁾ 0.7 (0.0) ²⁾	1.0 0.0	1.0 0.0
f _{wa}	Mittlerer Gewichtsanteil von Wasser in Nahrungsmitteln		0.75	0.75	0.75
I _N	Niederschlagsintensität (für Limite) Niederschlagsmenge im Bezugsjahr	mm/h mm/Jahr	- standortabhängig	2 -	2 -
I ₀	Bezugsintensität	mm/h	1	1	1
J	Mittlere jährliche Abflussmenge des jeweiligen Flusses (Vorfluter) - KKB/PSI - KKG - KKL - KKM	m ³ /Jahr	 1.8 · 10 ¹⁰ 9.0 · 10 ⁹ 3.3 · 10 ¹⁰ 3.8 · 10 ⁹	 - - - -	 - - - -
K ₀ K _e	Wiederaufwirbelungs-Koeffizienten	m ⁻¹	- -	- -	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁹
k _c	Umrechnungsfaktor Sekunden-Jahr	s/Jahr	3.16 · 10 ⁷	3.16 · 10 ⁷	3.16 · 10 ⁷
k _{mk}	Umrechnungsfaktor kg zu m ³ für Wasser	kg/m ³	1000	1000	1000
k _N	Niederschlags-Umrechnungsfaktor	(kg/m ²)/mm	1	1	1
k _s	Abschirmung für partiellen Aufenthalt im Haus		0.4	0.4 (Boden) 1 (Immersion)	0.4 (Boden) 1 (Immersion)
L	Immobilisierungskonstante am Boden	Jahr ⁻¹	-	-	3.7
P _{Pfl.} P _{PP} P _{FP}	Bodenmasse des Wurzelbereiches - Gemüse und Obst - Futterpflanzen	kg/m ²	 280 (Acker) 120 (Weide)	 280 (Acker) 120 (Weide)	 280 (Acker) 120 (Weide)
Q̇	Abgaberate	Bq/Jahr	-	-	-
Q	Gesamtabgabe (im Zeitraum)	Bq	-	-	-

Symbol	Bedeutung	Einheit	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr Langzeitabgabe	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr Kurzzeitabgabe	Auslegungs- störfälle
T	Expositionszeit (*siehe Kap. 4.2a)	Jahre	1	1	1 (*2.7·10 ⁻³ ;50)
T ₁ resp. T ₅₀	Integrationszeitraum	Jahre	1 resp. 50	-	-
T _E	Zeit zwischen Beginn des Kalenderjahres und Ernte- beginn (16. April)	Jahre	0.29	0.29	0.29
T _P	Zeit zwischen einem Er- eignis und dem Ende der nächsten Ernteperiode resp. Ernteperiode (Lang- zeitabgabe)	Jahre	0.5	8.3·10 ⁻²	8.3·10 ⁻² resp. 2.7·10 ⁻³
T _{fz}	Flugzeit bis zum Auf- schlagpunkt - Kernkraftwerke - PSI	Jahre	1.9·10 ⁻⁵ 2.4·10 ⁻⁶	1.9·10 ⁻⁵ 2.4·10 ⁻⁶	je nach Quelle
T _{Fi}	Verarbeitungszeit für Fisch	Jahre	2.7·10 ⁻³	2.7·10 ⁻³	2.7·10 ⁻³
T _{FI}	Verarbeitungszeit für Fleisch	Jahre	5.5·10 ⁻²	5.5·10 ⁻²	5.5·10 ⁻²
T _{Mi}	Verarbeitungszeit für Milch	Jahre	2.7·10 ⁻³	2.7·10 ⁻³	2.7·10 ⁻³
T _{Pfl} : T _{PP} , T _{FP}	Wachstumszeit von Pflan- zen: - Gemüse/Obst - Futterpflanzen und La- gerfutter	Jahre	0.16 8.3·10 ⁻²	0.16 8.3·10 ⁻²	0.16 8.3·10 ⁻²
V _{FP}	Futtermenge für Kühe und Rinder	kg/Tag	65	65	65
V _{TW}	Tränkemenge für Kühe und Rinder	m ³ /Tag	0.075	0.075	0.075
V _g	Ablagerungsgeschwindig- keit - Aerosole - elementares Iod	m/s	0.0015 m/s 0.01 m/s (0.017 m/s) ³⁾	0.0015 m/s 0.01 m/s -	0.0015 m/s 0.01 m/s -
Y _{Pfl} : Y _{PP} Y _{FP}	Bewuchsdichte für Pflan- zen: - Gemüse/Obst (pflanzl. Produkte) - Futterpflanzen	kg/m ²	2.4 0.85	2.4 0.85	2.4 0.85
κ	Korrekturkoeffizient für die Berechnung der Washout- faktoren - Iod, Aerosole - Tritium		0.8 1	0.8 1	0.8 1
Λ ₀	Referenzwashoutkoeffi- zient für eine Nieder- schlagsintensität I ₀ - elementares Iod, Aero- sole - tritiiertes Wasser	s ⁻¹	7·10 ⁻⁵ 3.5·10 ⁻⁵	7·10 ⁻⁵ 3.5·10 ⁻⁵	7·10 ⁻⁵ 3.5·10 ⁻⁵
λ _{slow}	nicht radioaktiver, langsa- mer Anteil der Abreiche- rung für Bodenstrahlung	Jahr ⁻¹	7.5·10 ⁻³	7.5·10 ⁻³	7.5·10 ⁻³

Symbol	Bedeutung	Einheit	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr Langzeitabgabe	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr Kurzzeitabgabe	Auslegungs- störfälle
λ_{fast}	nicht radioaktiver, rascher Anteil der Abreicherung für Bodenstrahlung	Jahr ⁻¹	1.1	1.1	1.1
λ_w	nicht radioaktiver Anteil der Abreicherung aus dem Wurzelbereich (Daten gemäss CHECOSYS - Tc, Sr, Cs - Ca, Br, Ba, Mn, Zn - I, Te - Übrige, z.B. Co, Pu	Jahr ⁻¹	7·10 ⁻² 3.5·10 ⁻² 1.7·10 ⁻² 0	7·10 ⁻² 3.5·10 ⁻² 1.7·10 ⁻² 0	7·10 ⁻² 3.5·10 ⁻² 1.7·10 ⁻² 0
λ_v	nicht radioaktive Abreicherungskonstante auf Pflanzen für - Aerosole - Iod	Jahr ⁻¹	18 32	18 32	18 32
Φ	mittlere absolute Luftfeuchtigkeit	kg/m ³	9·10 ⁻³	9·10 ⁻³	9·10 ⁻³
Ψ	Kohlenstoffkonzentration in der Luft	kg/m ³	1.8·10 ⁻⁴	1.8·10 ⁻⁴	1.8·10 ⁻⁴

- 1) Sofern keine vierparametrische Wetterstatistik vorliegt und der Washout über eine erhöhte Ablagerungsgeschwindigkeit berücksichtigt wird, ist für Iod ein Ablagerungsanteil auf der Pflanzenoberfläche von 1 anzunehmen.
- 2) Bis zum Vorliegen einer vierparametrischen Wetterstatistik ist für Langzeitabgaben $f_{LU} = 1$ und $f_N = 0$ zu setzen.
- 3) Sofern keine vierparametrische Wetterstatistik für einen Standort vorliegt und somit kein Langzeit-Washoutfaktor W_L bestimmt werden kann, wird der Washout mit Hilfe einer erhöhten Ablagerungsgeschwindigkeit v_g gemäss Anhang A2.3.2 berücksichtigt.

Anhang 7: Atemrate und Verzehrgewohnheiten der Umgebungsbevölkerung

Symbol	Bedeutung	Einheit	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr	Normalbetrieb / Störung mit Häufigkeit >10 ⁻¹ pro Jahr	Auslegungs- störfälle
			Langzeitabgabe	Kurzzeitabgabe	
U _{inh}	Atemrate	m ³ /s			
	Kleinkinder (1-jährig)		6.4 · 10 ⁻⁵	6.4 · 10 ⁻⁵	6.4 · 10 ⁻⁵
	10-jährige		1.8 · 10 ⁻⁴	1.8 · 10 ⁻⁴	1.8 · 10 ⁻⁴
	Erwachsene normal		2.5 · 10 ⁻⁴	2.5 · 10 ⁻⁴	2.5 · 10 ⁻⁴
	Erwachsene erhöht		–	–	3.5 · 10 ⁻⁴
U _{Fi}	Verzehrrate für Fisch	kg/Jahr			
	Kleinkinder (1-jährig)		0	0	0
	10-jährige		4*	4*	4*
	Erwachsene		4	4	4
U _{Fi}	Verzehrrate für Fleisch und Eier	kg/Jahr			
	Kleinkinder (1-jährig)		5	5	5
	10-jährige		69	69	69
	Erwachsene		71	71	71
U _{Mi}	Verzehrrate für Milch und Milchprodukte	kg/Jahr			
	Kleinkinder (1-jährig)		204	204	204
	10-jährige		123	123	123
	Erwachsene		129	129	129
U _{PP}	Verzehrrate für Gemüse	kg/Jahr			
	Kleinkinder (1-jährig)		50	50	50
	10-jährige		116	116	116
	Erwachsene		121	121	121
U _{TW}	Trinkwasserkonsum	m ³ /Jahr			
	Kleinkinder (1-jährig)		0.25	–	–
	10-jährige		0.65*	–	–
	Erwachsene		0.65	–	–

* Konservativ wurde der Wert für Erwachsene eingesetzt.

Für Störfallrechnungen wird während der ersten 8 Stunden des Fahndurchganges für die Inhalation von einer erhöhten Atemrate ausgegangen.

Für Erwachsene sind die Verzehrswerte analog zum CHECOSYS-Programm (ECOSYS mit auf schweizerische Verhältnisse angepassten Parametern), ausgehend von [A6]. Bei der Milch sind Trinkmilch, Käse, Butter, Rahm und Joghurt gewichtsanteilmässig berücksichtigt. Die Gemüse setzen sich aus Getreide, Blattgemüse, Wurzelgemüse, Fruchtgemüse, Kartoffeln, Obst und Beeren zusammen.

Aufenthalt im Freien und im Haus: Für die externe Langzeitbestrahlung wird angenommen, dass sich eine Person während 8 Stunden des Tages im Freien, während der restlichen Zeit in Häusern aufhält. Wenn man für die Abschirmung von Häusern im Mittel einen Faktor von 0.1 ansetzt, so resultiert aus diesen Annahmen ein Abschirmfaktor k_s von 0.4 (vgl. Anhang 6). Dieser Faktor darf angewendet werden für Immersion bei Langzeitabgaben und für Bodenstrahlung; für Kurzzeitabgaben und Störfallrechnungen wird bei Immersion resp. Submersion davon ausgegangen, dass sich eine Person während des ganzen Fahndurchzuges im Freien aufhält.

Anhang 8: Dosisfaktoren

Die Dosisfaktoren für Ingestion, Inhalation, Immersion und Bodenstrahlung für die Umgebungsbevölkerung sind grundsätzlich den Anhängen 5 und 6 der Strahlenschutzverordnung (StSV) zu entnehmen. Für Nuklide, welche dort nicht aufgeführt sind, sind die Werte gemäss der Tabelle auf der Website des ENSI zu verwenden (<https://www.ensi.ch/de/?p=29266>).

Anhang 9: Transferfaktoren

Die im Folgenden angegebenen Transferfaktoren stammen aus der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Deutschen Strahlenschutzverordnung. Sofern beim Transfer Wasser-Fisch kein Wert angegeben ist, ist ein Wert eines chemisch ähnlichen Elementes zu verwenden.

Element	Luftpfad				Wasserspfad
	Transfer Boden-Pflanze		Transfer Pflanze-Tier		
	TF _{Bo-FP}	TF _{Bo-PP}	TF _{FP-Mi}	TF _{FP-Fi}	TF _{Wa-Fi}
	(Bq/kg)/(Bq/kg)	(Bq/kg)/(Bq/kg)	Tage/kg	Tage/kg	m ³ /kg
Be	5.0E-04	5.0E-04	1.0E-04	1.0E-03	0.1
F	3.0E-02	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-01	
Na	4.0E-01	4.0E-01	4.0E-02	8.0E-02	0.1
Al	1.0E-03	1.0E-03	2.0E-04	2.0E-03	
Si	2.0E-04	2.0E-04	1.0E-04	4.0E-05	
P	5.0E-01	3.0E+00	3.0E-02	6.0E-02	2
S	9.0E-01	9.0E-01	2.0E-02	1.0E-01	1
Cl	5.0E+00	5.0E+00	2.0E-02	8.0E-02	
K	1.0E+00	1.0E+00	6.0E-03	2.0E-02	0.5
Ca	2.0E-01	6.0E-02	2.0E-02	1.0E-03	
Sc	2.0E-01	2.0E-01	5.0E-06	2.0E-02	
V	3.0E-03	5.0E-04	2.0E-05	3.0E-03	
Cr	1.0E-02	4.0E-03	3.0E-03	1.0E-02	0.2
Mn	2.0E-01	2.0E-01	3.0E-04	5.0E-04	0.1
Fe	5.0E-03	5.0E-03	3.0E-04	2.0E-02	0.1
Co	2.0E-02	2.0E-02	2.0E-04	1.0E-02	0.1
Ni	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-03	0.1
Cu	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-03	1.0E-02	0.01
Zn	3.0E-01	3.0E-01	1.0E-02	1.0E-01	0.4
Ga	3.0E-04	3.0E-04	5.0E-05	5.0E-01	
Ge	2.0E-01	6.0E-01	5.0E-04	5.0E-01	
As	6.0E-03	2.0E-03	7.0E-05	2.0E-03	
Se	5.0E-01	5.0E-01	5.0E-02	2.0E-02	0.2

Element	Luftpfad				Wasserspfad
	Transfer Boden-Pflanze		Transfer Pflanze-Tier		
	TF _{Bo-FP}	TF _{Bo-PP}	TF _{FP-Mi}	TF _{FP-Fi}	TF _{Wa-Fi}
	(Bq/kg)/(Bq/kg)	(Bq/kg)/(Bq/kg)	Tage/kg	Tage/kg	m ³ /kg
Br	1.0E-01	3.0E-01	5.0E-02	3.0E-02	
Rb	9.0E-01	9.0E-02	6.0E-03	1.0E-02	2
Sr	4.0E-01	4.0E-01	2.0E-03	6.0E-04	0.03
Y	3.0E-03	3.0E-03	1.0E-05	1.0E-03	
Zr	1.0E-03	3.0E-03	5.0E-06	2.0E-02	0.2
Nb	1.0E-02	1.0E-02	3.0E-03	3.0E-01	0.2
Mo	2.0E-01	5.0E-02	2.0E-03	7.0E-03	0.2
Tc	3.0E+00	3.0E+00	1.0E-05	4.0E-02	0.08
Ru	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-06	2.0E-03	0.1
Rh	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-03	
Pd	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	4.0E-03	
Ag	2.0E-01	2.0E-01	5.0E-02	2.0E-03	0.01
Cd	4.0E-01	4.0E-01	1.0E-03	4.0E-04	0.2
In	3.0E-01	3.0E-01	1.0E-04	8.0E-03	
Sn	2.0E-01	2.0E-01	3.0E-03	8.0E-02	3
Sb	1.0E-01	2.0E-02	2.0E-03	1.0E-03	0.1
Te	2.0E+00	2.0E+00	2.0E-04	8.0E-02	0.2

Herausgeber:
Eidgenössisches
Nuklearsicherheits-
inspektorat ENSI
CH-5201 Brugg

+41 (0)56 460 84 00
info@ensi.ch
www.ensi.ch

© ENSI
März 2022

ENSI-G14/d

ENSI
Industriestrasse 19
5201 Brugg
Schweiz

+41 56 460 84 00
info@ensi.ch
www.ensi.ch