

Projekt Konrad – Überprüfung
der sicherheitstechnischen
Anforderungen des Endlagers
Konrad nach dem Stand von
Wissenschaft und Technik
(ÜsiKo)

Abschlussbericht zur
Phase 2: Dosiskonversions-
faktoren

Philipp Horenburg
Ulrich Noseck
André Rübel
Jens Wolf

Februar 2025
KUVgO1-22-06-Lem

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im Rahmen des Vorhabens ÜsiKo erstellt.

Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Endlager, Konrad, Langzeitsicherheitsnachweis, Nachbetriebsphase, Radionuklid, Transport, Dosis, Strahlenexposition

Inhaltsverzeichnis

	Abgrenzung des Auftrags der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH durch BGE	7
1	Einleitung und Aufgabenstellung	9
2	Beschreibung	12
3	Bearbeitung	14
3.1	Abschätzung der äußeren Exposition	15
3.1.1	Exposition durch Gammastrahlung bei Aufenthalt auf berechneten Böden	16
3.1.2	Exposition durch Gammastrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment (Gammabodenstrahlung)	20
3.2	Abschätzung der inneren Exposition	24
3.2.1	Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)	25
3.2.2	Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch (Ingestion)	26
3.2.2.1	Trinkwasser	27
3.2.2.2	Süßwasserfisch	27
3.2.2.3	Pflanzliche Nahrungsmittel	28
3.2.2.4	Blattgemüse	29
3.2.2.5	Milch und Milchprodukte	29
3.2.2.6	Fleisch und Fleischwaren	30
3.2.2.7	Muttermilch	31
3.2.2.8	Gesamtdosis durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch	32
3.2.3	Exposition durch Aufnahme kontaminierten Bodens über den Mund (Bodeningestion)	34
3.3	Abschätzung der Gesamtdosis	35
4	Resümee und Zusammenfassung	44

5	Literatur.....	46
A	Ergebnisse nach Altersklassen	49
B	Physikalische und dosimetrische Eingangsdaten.....	56

Gesamtseitenzahl: 64

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Einfluss von radioaktivem Zerfall während Sedimentationsprozessen am Beispiel von Ac-227	23
Abb. 3.2	Nutzungs- und Ingestionspfade bei der Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre	25
Abb. 3.3	Nuklidspezifische Aufschlüsselung der einzelnen Dosiskonversionsfaktoren der Altersklasse > 17 a	35
Abb. 3.4	Nuklidspezifische Aufschlüsselung der einzelnen Dosiskonversionsfaktoren der Altersklasse 1 - 2 a	36
Abb. 3.5	Nuklidspezifische Aufschlüsselung der kumulierten, auf die Aktivitätskonzentration normierten Lebenszeitdosen	39
Abb. 3.6	Berechnete Dosiskonversionsfaktoren aller betrachteten Nuklide normiert auf die aus /PRO 91/ abgeleiteten Werte für die Altersgruppe > 17 bzw. Erwachsene.....	39
Abb. 3.7	Berechnete Dosiskonversionsfaktoren aller betrachteten Nuklide normiert auf die aus /PRO 91/ abgeleiteten Werte für die Altersgruppe 1 – 2 a bzw. Kleinkinder.....	40

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Meilensteine in der Historie der Bergwerksanlage bzw. des Endlagers Konrad	10
Tab. 3.1:	Lokale Klimadaten (Monat I, Temperatur T_i , relative Luftfeuchte F_i , Niederschlagsmenge P_i) für den Standort Braunschweig Völkenrode gemittelt über den Zeitraum von Januar 1961 bis Dezember 1980 nach /BFS 90/, sowie des jeweils daraus berechneten Wasserdefizits B_i	19
Tab. 3.2:	Lokale Klimadaten (Monat I, Temperatur T_i , relative Luftfeuchte F_i , Niederschlagsmenge P_i) der Station 662 (Braunschweig Völkenrode) des Deutschen Wetterdienstes gemittelt über den Zeitraum von Januar 1993 bis Dezember 2022 sowie des jeweils daraus berechneten Wasserdefizits B_i	20
Tab. 3.3	Berechnete Dosiskonversionsfaktoren $[(Sv/a)/(Bq/l)]$ für Erwachsene im Vergleich mit den aus /PRO 91/ abgeleiteten Werten	40
Tab. 3.4	Berechnete Dosiskonversionsfaktoren $[(Sv/a)/(Bq/l)]$ für Kleinkinder 1-2 a im Vergleich mit den aus /PRO 91/ abgeleiteten Werten	41
Tab. 3.5	Berechnete Dosiskonversionsfaktoren $[(Sv/a)/(Bq/L)]$ für die Berechnung der über die Lebenszeit gemittelten potenziellen jährlichen Strahlenexposition einer repräsentativen Person von Geburt bis einschließlich des 70. Lebensjahres	43
Tab. A.1	Dosiskonversionsfaktoren für alle Altersgruppen summiert über alle Expositionspfade	49
Tab. A.2	Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse ≤ 1 a	50
Tab. A.3	Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 1 – 2 a	51
Tab. A.4	Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 2 – 7 a	52
Tab. A.5	Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 7 – 12 a	53
Tab. A.6	Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 12 – 17 a	54
Tab. A.7	Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse > 17 a	55

Tab. B.1:	Zur Berechnung verwendete physikalische Parameter der betrachteten Radionuklide	56
Tab. B.2:	Zur Berechnung verwendete Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten für Bodenstrahlung und Inhalation	57
Tab. B.3:	Zur Berechnung verwendete Dosiskoeffizienten für Ingestion von Lebensmitteln und Muttermilch	58
Tab. B.4:	Zur Berechnung verwendete Parameter bei Anlagerungsprozessen an Schwebstoffe in Oberflächengewässern	59
Tab. B.5:	Zur Berechnung verwendete Transfer- und Konzentrationsfaktoren	60
Tab. B.6:	Parameter zu Aufenthaltsdauern und Reduktionsfaktoren.....	61
Tab. B.7:	Dimensionslose Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie nach Altersklassen	61
Tab. B.8:	Verzehrgewohnheiten nach Altersklassen	61
Tab. B.9:	Bodeningestion nach Altersklassen	62
Tab. B.10:	Sonstige zur Berechnung verwendete Parameter	62

Abkürzungsverzeichnis

AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
EU	Erläuternde Unterlage
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
LZSA	Langzeitsicherheitsanalyse
NMU	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz
PFB	Planfeststellungsbeschluss /PFB 02/
PFV	Planfeststellungsverfahren
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
StrSchV	Strahlenschutzverordnung /SSV 18/
ÜsiKo	Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik
W&T	Wissenschaft und Technik

Abgrenzung des Auftrags der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH durch BGE

Die Erstellung des nachfolgenden Berichts „Projekt Konrad – Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo), Abschlussbericht zur Phase 2: Dosiskonversionsfaktoren“ wurde von der BGE an die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Rahmen der ÜsiKo Phase 2 beauftragt (ÜsiKo = „*Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik*“). Die ÜsiKo wird – initiiert von der BGE als verantwortungsvolle Vorhabenträgerin – unabhängig von der jederzeit gegebenen behördlichen Überwachung, als selbstständige Überprüfung durch externe Fachgutachter und Sachverständige durchgeführt. Der Planfeststellungsbeschluss Konrad ist bestandskräftig. Er selbst ist kein Gegenstand der Überprüfung i. S. d. ÜsiKo.

Inhalte und Ergebnisse des nachfolgenden Berichts liegen allein in der Verantwortung des jeweiligen Verfassers, der seinen Auftrag selbstständig und frei von Weisungen erfüllt hat. Die Ausführungen in diesem Kapitel erfolgen von Seiten der BGE und dienen ausschließlich der Einordnung der Bearbeitung des Auftrags für ÜsiKo Phase 2:

Die ÜsiKo umfasst bislang folgende zwei Phasen: Die Phase 1 (2017 - 2020) diente der Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Hier wurde fachgutachterlich untersucht, ob in Bezug auf die Sicherheitsanalysen für das Endlager Konrad ein allgemeiner Fortschritt im Stand von Wissenschaft und Technik eingetreten ist. Soweit dies der Fall ist, wurde dieser Fortschritt als sogenanntes Delta formuliert. Zum überwiegenden Teil wurde bereits in Phase 1 festgestellt, dass der konstatierte Fortschritt keine Relevanz in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad aufweist. Konnte eine Relevanz in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad – in vereinzelt Fällen – in Phase 1 nicht von vornherein ausgeschlossen werden, wurde insoweit ein weiterer Betrachtungsbedarf für Phase 2 ermittelt (sog. sicherheitsrelevante Deltas).

Die Feststellung eines sogenannten sicherheitsrelevanten Deltas in Phase 1 allein lässt keine Schlussfolgerungen in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad zu. Es wird lediglich festgestellt, dass sich der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Anforderungen an ein heute neu zu genehmigendes Endlager verändert hat und eine sicherheitstechnische Relevanz nicht von vornherein verneint werden kann.

Die ÜsiKo sieht für diesen Fall vor, dass eine weitergehende fachgutachterliche Betrachtung in Phase 2 (Aktualisierung von Sicherheitsanalysen) erfolgt.

Bei der Aktualisierung von Sicherheitsanalysen (Phase 2 der ÜsiKo) setzen sich die Fachgutachter mit den konkreten Ausprägungen eines Fortschritts im Stand von Wissenschaft und Technik mit Bezug zu den sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad (sog. Sicherheitsrelevanz) auseinander. Im Rahmen der Bearbeitung in Phase 2 werden z. B. neue Modellrechnungen vorgenommen. Sodann wird untersucht, ob eine Relevanz dieser Ergebnisse für die Sicherheitsanforderungen des Endlagers Konrad nach Phase 2 ausgeschlossen werden kann (1.) oder ob die Sicherheitsrelevanz weiter besteht (2.).

1. Soweit fachgutachterlich festgestellt wird, dass sich die in Phase 1 identifizierte potenzielle Sicherheitsrelevanz nach dem Ergebnis der Phase 2 nicht bestätigt, sind Folgerungen in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers Konrad ausgeschlossen. In diesem Fall wird das Delta bereits mit der Aktualisierung der Sicherheitsanalysen geschlossen. Für den Fall, dass die Fachgutachter hier gleichwohl Empfehlungen abgeben, bedeutet dies nicht, dass ihre Umsetzung im Hinblick auf die Sicherheit des Endlagers geboten ist. In diesen Fällen wird die BGE in Abstimmung mit den Behörden vielmehr im Einzelfall bewerten, ob und wenn ja, in welcher Weise eine Realisierung erfolgt, um ggf. einen Beitrag zur überobligatorischen Optimierung der Sicherheit des Endlagers zu leisten.

2. Soweit die Sicherheitsrelevanz eines Deltas für das Endlager Konrad nach der fachgutachterlichen Untersuchung nicht ausgeschlossen werden kann, wird die BGE in Abstimmung mit den Behörden unter Einbeziehung etwaiger Empfehlungen der Gutachter über etwaige Maßnahmen beraten und diese – soweit erforderlich – anschließend umsetzen.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das zukünftige Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle Konrad liegt im südöstlichen Niedersachsen auf dem Gebiet der Stadt Salzgitter. Die Schachtanlage Konrad hat zwei Schächte Konrad 1 und Konrad 2 mit Tiefen von 1.200 bzw. 1.000 Metern. Die wichtigsten zeitlichen Meilensteine in der Historie der Bergwerksanlage bzw. des Endlagers Konrad sind in Tab. 1.1 zusammengestellt.

Der untertägige Bereich des Endlagers wird als Erweiterung des Grubengebäudes eines bestehenden ehemaligen Eisenerzbergwerks errichtet. Das Eisenerzvorkommen in einer Tiefe von 1.300 bis 800 Metern hat eine Mächtigkeit von 12 bis 18 Metern. In zwei neu aufgefahrenen Einlagerungsbereichen in 800 m Tiefe sollen bis zu 303.000 Kubikmeter radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung endgelagert werden. Im Jahr 1982 stellte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) als damals für die Endlagerung zuständige Behörde einen Antrag auf Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens (PFV). Im Frühjahr 1989 reichte sie den Plan bei der zuständigen Genehmigungsbehörde Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (NMU) ein. Mit seiner Gründung ging die Zuständigkeit für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle im November 1989 auf das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) über. Die ursprünglichen Antragsunterlagen für das Endlager Konrad wurden in den 1990er Jahren erstellt und bis zur Erteilung des Planfeststellungsbeschlusses (PFB) im Jahr 2002 aktualisiert.

Das PFV für Konrad war ein atomrechtliches Genehmigungsverfahren, das sowohl eine Umweltverträglichkeitsprüfung als auch eine Öffentlichkeitsbeteiligung beinhaltete. Darauf basierend hat die Genehmigungsbehörde unter Beteiligung von Sachverständigen im Jahr 2002 mit dem PFB festgestellt, dass die erforderliche Vorsorge gegen Schäden aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle gemäß dem damaligen Stand von W&T gewährleistet ist.

Die Verantwortung für das Endlager Konrad lag bis zum 24. April 2017 beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Auf Grundlage des Gesetzes zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung, das am 30. Juli 2016 in Kraft trat und dem Bescheid des Bundes vom 24.4.2017, wurde die Aufgabenwahrnehmung der Planung, Errichtung und Betrieb der Endlager für radioaktive Abfälle so auch für das Endlager Konrad, auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) übertragen.

Tab. 1.1 Meilensteine in der Historie der Bergwerksanlage bzw. des Endlagers Konrad

Jahr	Ereignis
1957	Beginn des Abteufens von Schacht Konrad 1
1965	Beginn der Eisenerzförderung
1975	Beginn der Eignungsuntersuchungen als Endlager
1976	Ende der Erzförderung
1982	Einleitung des Planfeststellungsverfahrens
1986	Erstellung der Langzeitsicherheitsanalyse
2002	Erteilung des Planfeststellungsbeschlusses
2007	Gerichtliche Bestätigung, Beginn der Umrüstung
2017	Übertragung der Betreiberaufgaben auf die BGE
2017	Beginn der ÜSiKo Phase 1
2020	Beginn der ÜSiKo Phase 2

Die „Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜSiKo)“ erfolgt vorsorglich. Der Prozess der Überprüfung begann im Jahr 2016 mit einem öffentlichen Workshop, welcher der Diskussion über das sinnvolle und notwendige Vorgehen bei der Überprüfung diente. Als Folge und unter Berücksichtigung der Diskussion wurden folgende vier Phasen für die ÜSiKo festgelegt:

1. Ermittlung des Überprüfungsbedarfs
2. Aktualisierung von Sicherheitsanalysen
3. ggf. Anpassung der Planung
4. ggf. Umsetzung im Bau

In Phase 1 der ÜSiKo wurde zunächst untersucht, ob in Bezug auf die Sicherheitsanalysen ein allgemeiner Fortschritt im Stand von Wissenschaft und Technik festzustellen ist. Soweit dies festgestellt wurde, wurde weiter untersucht, ob eine Relevanz für die Sicherheitsanforderungen des Endlagers Konrad ausgeschlossen werden kann. Soweit dies in Phase 1 nicht möglich war, wurde ein vertiefter Betrachtungsbedarf für einzelne Aspekte der Sicherheitsanalysen festgestellt, der in Phase 2 erfolgt. In den Jahren 2017 bis 2020

erfolgte in der ersten Phase der ÜsiKo unter anderem die Überprüfung der Langzeitsicherheitsanalysen zur Radionuklid Ausbreitung in der Nachbetriebsphase /RUE 19/. Im Rahmen dieser Überprüfung wurden Aspekte zu den genannten Themengebieten identifiziert, für die sich potenziell sicherheitsrelevante Abweichungen, auch als Delta (Δ) bezeichnet in der Argumentation zwischen dem Stand von W&T im Jahr 2019 gegenüber dem damaligen Stand von W&T zur Zeit der Erstellung ergeben.

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten sind Teil der Phase 2 („Aktualisierung von Sicherheitsanalysen“) der ÜsiKo. Im Rahmen der durchgeführten Analysen wird das Δ_{33} der in der ersten Phase der ÜsiKo identifizierten Deltas bewertet, welches die Neuberechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre nach den aktuell gültigen Vorschriften betrifft. Die Nummerierung und Bezeichnung der Deltas richtet sich nach der veröffentlichten Liste der BGE /BGE 21/.

Die Ergebnisse der ersten Phase der ÜsiKo wurden durch ein unabhängiges Review-Team überprüft /ROE 19/. Die Aussagen dieses Reviews werden bei den durchgeführten Arbeiten berücksichtigt, insofern sie das genannte Delta betreffen.

In den Kapiteln 2 und 3 wird das Delta beschrieben und bearbeitet und das Ergebnis in Kapitel 4 zusammengefasst.

Anmerkungen aus der Fachöffentlichen Ergebnispräsentation zur ÜsiKo Phase 2:

Im Rahmen der Vorstellung der Ergebnisse zur Fachöffentlichen Ergebnispräsentation der ÜsiKo Phase 2 am 23.10.2024 in Braunschweig wurden abgesehen von Fragen der Begrifflichkeiten keine inhaltlichen Anmerkungen zu den durchgeführten Arbeiten gemacht, so dass daraufhin keine wesentlichen Überarbeitungen dieses Berichts vorgenommen wurden.

2 Beschreibung

In der Phase 1 der ÜsiKo wurde die Langzeitsicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad im Hinblick auf sicherheitsrelevante Abweichungen im Stand von W&T zur Zeit des PFB zum Jahr 2019 begutachtet /RUE 19/. In Phase 1 wurde folgender Aspekt zur Bearbeitung in der ÜsiKo Phase 2 identifiziert:

Seit dem PFB für das Endlager Konrad wurden sowohl die Strahlenschutzverordnung, als auch die AVV zur Berechnung der Strahlenexposition überarbeitet und dabei insbesondere die zu Grunde liegenden Verzehrgewohnheiten geändert. Es wird empfohlen, die Dosisberechnung an die aktuelle Strahlenschutzverordnung und die zugehörige aktuelle AVV zu § 47 der Strahlenschutzverordnung anzupassen.

Das Review-Team der Phase 1 der ÜsiKo empfiehlt zusätzlich „die künftig (ab 1.1.2019) gültige Strahlenschutzverordnung und deren einschlägige nachgeordnete Bestimmungen zugrunde zu legen.“ /ROE 19/.

Das in /RUE 19/ festgestellte Delta zur Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre durch nicht mehr gültige Verordnungen ist grundsätzlich weiterhin zutreffend, allerdings haben sich seit der Durchführung der ÜsiKo Phase 1 die gesetzlichen Vorschriften weiter folgendermaßen geändert:

- Seit Juni 2020 ist die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) Tätigkeiten zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten in Kraft getreten /BMU 20/.
Entsprechend § 11.2 der AVV Tätigkeiten tritt die zum Zeitpunkt der Phase 1 der ÜsiKo gültige und im Delta genannte AVV zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) außer Kraft. Damit ist das in Phase 1 der ÜsiKo genannte Vorgehen nicht weiter gültig.
Nach § 1.3 Punkt 2 ist die AVV Tätigkeiten allerdings nicht für Prognoserechnungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen anzuwenden.
- Im Dezember 2022 wurde die „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen“ veröffentlicht /BASE 22/.
Entsprechend Kapitel 2 ist die Berechnungsgrundlage nur im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Rahmen der weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen anzuwenden und gilt

nicht für die zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in einem separaten Endlagerbergwerk.

Entsprechend der in den beiden vorangegangenen Spiegelstrichen genannten Verordnung besteht damit zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts keine verbindliche Regelung bezüglich der im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse durchzuführenden Berechnung der Dosis durch aus einem Endlager für nicht-wärmeentwickelnde Abfälle potenziell freigesetzten Radionuklide.

Der Auftragnehmer GRS hat sich dazu entschlossen, in Phase 2 der ÜsiKo die Berechnung der Dosis bzw. der Dosiskonversionsfaktoren für die Langzeitsicherheitsanalyse Konrad in Anlehnung zu den Vorgaben in der Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen durchzuführen, da diese Verordnung die einzige verfügbare spezifische Berechnungsgrundlage für die Endlagerung darstellt, obwohl sie auf das Endlager Konrad, in das ausschließlich nicht-wärmeentwickelnde Abfälle eingelagert werden, keine Anwendung findet.

In der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad wird die Transportmodellierung der Radionuklide in der Geosphäre /STO 86/ von der Biosphärenmodellierung /PRO 91/ getrennt bearbeitet. Im Rahmen der Biosphärenmodellierung werden auf Grundlage der regulatorischen Vorgaben aus der Konzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser Dosiswerte ermittelt. Zur Bearbeitung des in diesem Bericht behandelten Deltas zur Dosisberechnung und zur Abgrenzung von den Deltas zur Transportmodellierung wird hier ähnlich vorgegangen. In diesem Bericht wird anhand der regulatorischen Vorgaben ermittelt, welche Dosis aus einer normierten Konzentration (im Folgenden als Einheitskonzentration bezeichnet) im oberflächennahen Grundwasser folgt. Den Umrechnungsfaktor von der Konzentration der Radionuklide in Werte für die mittlere effektive Jahresdosis nennt man auch Dosiskonversionsfaktor¹ (DKF). Die tatsächliche zeitlich abhängige Dosisberechnung als Folge der Ausbreitung von Radionukliden aus dem Endlager Konrad bis in das oberflächennahe Grundwasser erfolgt in dem Bericht zur Bearbeitung der Deltas zur Transportmodellierung /RUE 25/.

¹ Der Begriff findet zwar im zum Stand der Berichtserstellung gültigen Regelwerk keine Verwendung, ist aber bei sicherheitsanalytischen Betrachtungen sowohl im nationalen (z. B. /BFS 09/) als auch im internationalen Rahmen gebräuchlich (*biosphere dose conversion factor*, BDCF /NAG 02/, /IAEA 16/).

3 **Bearbeitung**

Die hilfswise herangezogene Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen /BASE 22/ (im Folgenden kurz Berechnungsgrundlage genannt) sieht verschiedene zu berücksichtigende Expositionspfade vor, auf denen die Ausbreitung von radioaktiven Stoffen in der Biosphäre zur Kontamination von Umweltmedien und Lebensmitteln und somit schließlich zur Strahlenexposition von Personen führen können. Im Rahmen des zu bearbeitenden Deltas sind Dosiskonversionsfaktoren für alle Pfade zu ermitteln, auf denen die aus dem Endlager Konrad bis in das oberflächennahe Grundwasser freigesetzten, gelösten Radionuklide Transport- und Transferprozessen in der Biosphäre unterliegen. Es sind jene Radionuklide zu berücksichtigen, für die in der Langzeitsicherheitsanalyse für das Endlager Konrad /STO 86/ bzw. /PRO 91/ Konzentrationen im oberflächennahen Aquifer berechnet wurden. Dabei handelt es sich ausschließlich um im Grundwasser gelöste Radionuklide. Aus dem Teilvorhaben zur Radionuklid Ausbreitung der ÜSiKo in der Phase 2 ergeben sich keine weiteren Anforderungen bezüglich Dosiskonversionsfaktoren weiterer Radionuklide /RUE 25/.

Gemäß der Berechnungsgrundlage sind für die Biosphärenmodellierung neben dem derzeitigen Klima auch zukünftig zu erwartende klimatische Verhältnisse und die Übergänge zwischen diesen klimatischen Verhältnissen zu berücksichtigen. In der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad wurden gleichbleibende klimatische Verhältnisse betrachtet. Diese Annahme liegt auch diesem Bericht zugrunde.

Grundsätzlich lässt sich zwischen Pfaden äußerer und innerer Strahlenexposition unterscheiden. Äußere Expositionspfade umfassen die von kontaminierten Böden und Ufersedimenten ausgehende Gammabodenstrahlung (Kap. 3.1), während die Ingestion kontaminierter Lebensmittel und Bodenpartikel sowie die Inhalation resuspendierter Staubpartikel die inneren Expositionspfade bilden (Kap. 3.2). Die Dosisbeiträge der einzelnen Pfade sind für die in Anlage 11 Teil B der Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) /SSV 18/ genannten sechs verschiedenen Altersklassen einer repräsentativen Person entsprechend ihrer jeweiligen Lebensgewohnheiten zu ermitteln und zu einer Abschätzung einer über die Lebenszeit von 70 Jahren gemittelten, effektiven Jahresdosis heranzuziehen.

Die folgenden Ausführungen geben grundsätzlich die Vorgaben in der Berechnungsgrundlage /BASE 22/ wieder, weshalb die Berechnungsgrundlage nicht an jeder Stelle

erneut zitiert wird. Wörtliche Auszüge aus der Berechnungsgrundlage sowie die aus der Berechnungsgrundlage direkt übernommenen Formeln werden nicht gesondert kenntlich gemacht. Es werden dann Zitate aufgeführt, wenn die Berechnungsgrundlage auf andere Quellen verweist oder wenn Bezug auf konkrete Zahlenwerte für eingehende Parameter genommen wird. So ist beispielsweise die im vorangehenden Absatz genannte Abschätzung einer über die Lebenszeit gemittelten effektiven Jahresdosis eine Vorgabe in /BASE 22/, während bei der dabei vorgenommenen Berücksichtigung der Altersgruppen auf /SSV 18/ verwiesen wird.

Es wird im Folgenden explizit darauf hingewiesen, falls begründet von der Berechnungsgrundlage abgewichen wird und andere Quellen herangezogen werden.

3.1 Abschätzung der äußeren Exposition

Die äußere Exposition erfolgt durch Gammabodenstrahlung, der die repräsentative Person durch Aufenthalt auf kontaminierten Böden sowie Ufersedimenten im Freien ausgesetzt ist. Die Kontamination von Böden erfolgt durch Bewässerung mit Grundwasser, während die Kontamination von Ufersedimenten von Sedimentationsprozessen geprägt ist. Zur Abschätzung der äußeren Exposition ist gemäß der Berechnungsgrundlage anzunehmen, dass sich die repräsentative Person pro Kalenderjahr entweder 760 h auf Ufersedimenten (Kap. 3.1.2) und 1.000 h auf anderen Stellen im Freien oder aber lediglich 1.760 h auf anderen Stellen im Freien aufhält, wobei die ungünstigere Variante zu veranschlagen ist. Die Kontamination anderer Stellen im Freien erfolgt angesichts der klimatischen Verhältnisse durch Beregnung von Böden (Kap. 3.1.1).

Eine Exposition durch den Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten und Spülfeldern sowie durch Gammasubmersion und Betasubmersion ist nicht zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der berechneten Dosisbeiträge zur äußeren Exposition aller Altersklassen sind der dritten und vierten Spalte der Tab. A.2 bis Tab. A.7 zu entnehmen.

3.1.1 Exposition durch Gammastrahlung bei Aufenthalt auf beregneten Böden

Die effektive Dosis $E_{b,r}$ eines Radionuklids r durch Gammabodenstrahlung im Bezugsjahr k berechnet sich gemäß der Berechnungsgrundlage nach

$$E_{b,r} = g_{b,r,eff} \cdot [f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}] \cdot (t_{Fr} + f_{Ge,b} \cdot t_{Ge}) \cdot B_{k,r}(t_{1a}) \quad (1)$$

Die nuklidspezifischen Dosisleistungskoeffizienten $g_{b,r,eff}$ in $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, die dimensionslosen Anteile f_r des Gamma-Emissionsspektrums oberhalb einer Energie von 0,2 MeV sowie die dimensionslosen Altersklassenfaktoren $c_{Geo,b1}$ und $c_{Geo,b2}$ zur Berücksichtigung der Körpergeometrie sind gemäß /SSV 18/ der Beilage des Bundesanzeigers Nr. 160a und b vom 28. August 2001 zu entnehmen /BAZ 01/. Sofern tabelliert, wurden stets die Dosisleistungskoeffizienten verwendet, die der Entstehung von Tochternukliden Rechnung tragen. Die Aufenthaltsdauern t_{Fr} im Freien und t_{Ge} in Gebäuden sowie der Reduktionsfaktor $f_{Ge,b}$ für Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt in Gebäuden sind Tabelle 11 der Berechnungsgrundlage entnommen und entstammen der Strahlenschutzverordnung /SSV 18/. Die flächenbezogene Aktivität im Wurzelbereich $B_{k,r}(t_{1a})$ bezüglich des Radionuklids r_i mit der Position i innerhalb einer Zerfallsreihe im Bezugsjahr k ist definiert nach:

$$\frac{dB_{k,r_i}(t)}{dt} = \dot{Q}_{W,k,r_i} + \lambda_{r_{i-1}} \cdot a_{r_{i-1},r_i} \cdot B_{k,r_{i-1}}(t) - (\lambda_{r_i} + \lambda_{m,r_i}) \cdot B_{k,r_i}(t) \quad (2)$$

Darin ist \dot{Q}_{W,k,r_i} die flächenbezogene Eintragsrate des Radionuklids r_i durch Bewässerung im Bezugsjahr k in $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, λ_{r_i} die physikalische Zerfallskonstante in s^{-1} , a_{r_{i-1},r_i} der dimensionslose Anteil der Zerfälle des Nuklids r_{i-1} , die das Nuklid r_i als Zerfallsprodukt aufweisen und λ_{m,r_i} die Verweilkonstante im Wurzelbereich der Pflanzen aufgrund des Transports in tiefergelegene Bodenschichten in s^{-1} . Die Indizierung r_{i-1} kennzeichnet das Mutternuklid des Nuklids r_i , sofern es Teil einer Zerfallsreihe ist.

Gleichung (2) ist eine inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung und kann zur Ableitung eines Ausdrucks für $B_{r_i}(t)$ unter Berücksichtigung der in /BASE 22/ genannten Randbedingungen mit einem Separationsansatz analytisch gelöst werden:

$$B_{ri}(t) = - \frac{\dot{Q}_{W,ri} + \lambda_{ri-1} \cdot a_{ri-1,ri} \cdot B_{ri-1}(t)}{\lambda_{ri} + \lambda_{m,ri}} \cdot e^{-(\lambda_{ri} + \lambda_{m,ri}) \cdot t} + \frac{\dot{Q}_{W,ri} + \lambda_{ri-1} \cdot a_{ri-1,ri} \cdot B_{ri-1}(t)}{\lambda_{ri} + \lambda_{m,ri}} \quad (3)$$

Zur Berechnung von $E_{b,r}$ wird die analytische Lösung gemäß Gleichung (3) anstatt einer rekursiven Berechnung mit Gleichung (2) verwendet. Die flächenbezogene Aktivität im Wurzelbereich kann damit für beliebige Zeitpunkte t in s berechnet werden, sodass auf eine Indizierung zur Ausweisung des Bezugsjahres verzichtet wird. Zur oberen Abschätzung der flächenbezogenen Aktivität im Wurzelbereich wird der exponentiell abklingende erste Term der Gleichung (3) vernachlässigt und der konstante Term als oberer Grenzwert herangezogen. Zur Berechnung von $B_{ri}(t)$ für Nuklide ri einer Zerfallsreihe ist als Eingangsgröße vorab die flächenbezogene Aktivität im Wurzelbereich $B_{ri-1}(t)$ des jeweiligen Mutternuklids $ri-1$ zu ermitteln.

Die flächenbezogene Eintragsrate $\dot{Q}_{W,ri}$ des Radionuklids ri durch Bewässerung errechnet sich gemäß /BASE 22/ aus dem Produkt des jährlichen Wasserdefizits und der mittleren Aktivitätskonzentration $C_{k,ri}^W$ im Wasser, die für alle Nuklide mit der Einheitskonzentration $1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ veranschlagt wird. Das Wasserdefizit B_i im Monat i wird mit Hilfe des Ausdrucks

$$B_i = (2 + 0,2 \cdot T_i) \cdot T_i - 1,2 \cdot (F_i - 80) - P_i \quad (4)$$

und der eingehenden mittleren monatlichen Lufttemperatur T_i in $^{\circ}\text{C}$, der mittleren relativen Luftfeuchte F_i in % und dem mittleren monatlichen Niederschlag P_i in mm abgeschätzt /BASE 22/. Als lokale Klimadaten wurden in der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad /STO 86/ mittlere Werte aus der Zeit von Januar 1961 bis Dezember 1980 für den Standort Braunschweig Völkrode herangezogen, die in den Tabellen 3.1.7/4 und 3.1.7/7 im Plan Endlager für radioaktive Abfälle, Schachanlage Konrad Salzgitter /BFS 90/ zusammengestellt sind. Diese Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst an der Station 662 erhoben /DWD 23/². Zum Vergleich werden zusätzlich neuere Daten des

² Die heute bereitgestellten Primärdaten des Deutschen Wetterdienstes der Niederschlagsmenge weichen geringfügig von den im Plan Endlager für radioaktive Abfälle, Schachanlage Konrad /BFS/ 90/ aufgeführ-

Deutschen Wetterdienstes aus der Zeit von 1993 bis 2022 herangezogen, die an derselben Station gemessen wurden (Tab. 3.1). Dabei zeigt sich, dass sich unter Verwendung der aktuelleren Klimadaten gemittelt über die Jahre von 1993 bis 2022 ein größeres Wasserdefizit gemäß Gleichung (4) ergibt als für die Daten der Jahre 1961 bis 1980. Das steigende Wasserdefizit kann insbesondere auf höhere mittlere Monatstemperaturen T_1 der aktuelleren Daten zurückgeführt werden. Die monatliche Durchschnittstemperatur geht quadratisch in Gleichung (4) ein und dominiert gegenüber den linearen Einflüssen der Luftfeuchte F_1 und der Niederschlagsmenge P_1 . Für die ÜsiKo wird wie in der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad /STO 86/ von gegenüber heute gleichbleibenden klimatischen Bedingungen ausgegangen. Das durch Bewässerung auszugleichende jährliche Defizit W ergibt sich unter Verwendung der über die Jahre 1993 bis 2022 gemittelten Klimadaten zu etwa $192 \text{ mm}^2/\text{a}$ entsprechend einer Bewässerungsrate von $6,07 \cdot 10^{-6} \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Tab. 3.1).

Die in Gleichung (3) eingehenden physikalischen Zerfallskonstanten λ_{ri} und Zerfallsanteile $a_{ri-1,ri}$ werden der Datenbank Nuclear Data Services /IAEA 22/ der International Atomic Energy Agency entnommen (siehe Anhang B). Für die Verweilkonstante λ_m im Wurzelbereich erfolgt die elementspezifische Zuordnung gemäß Tabelle 2 in /BASE 22/. Nicht explizit aufgeführte Elemente werden den Actinoiden zugeordnet. Zur oberen Abschätzung werden für alle Elemente die aufgeführten Werte für Ackerboden verwendet. Für diese Bodenart sind für alle Elemente die jeweils kleinsten Verweilkonstanten λ_m , also die höchsten mittleren Verweildauern ausgewiesen.

ten Werten ab. Die Ursache dafür lässt sich nicht exakt nachvollziehen, kann aber am ehesten auf Änderungen der Referenzzeiten bei Erfassung der Zeitreihen zurückgeführt werden. Die Abweichungen haben jedoch keinen signifikanten Einfluss auf das Wasserdefizit.

Tab. 3.1: Lokale Klimadaten (Monat I, Temperatur T_i , relative Luftfeuchte F_i , Niederschlagsmenge P_i) für den Standort Braunschweig Völkenrode gemittelt über den Zeitraum von Januar 1961 bis Dezember 1980 nach /BFS 90/, sowie des jeweils daraus berechneten Wasserdefizits B_i

Monat	I	T_i [°C]	F_i [%]	P_i [mm]	B_i [mm]
Januar	1	0,1	85	43,9	0,0
Februar	2	1,1	84	35,1	0,0
März	3	3,8	79	39,8	0,0
April	4	7,7	75	50,5	0,0
Mai	5	12,3	72	62,1	2,4
Juni	6	15,9	73	69,2	21,6
Juli	7	16,9	75	62	34,9
August	8	16,8	74	66,1	31,1
September	9	13,8	79	45,7	21,2
Oktober	10	9,5	83	38,2	0,0
November	11	4,8	85	50,3	0,0
Dezember	12	1,3	86	49,4	0,0
Jahr					111,2 ³

³ In /STO 86/ wurde das Wasserdefizit für diesen Zeitraum mit einer einfachen Abschätzung ermittelt und fällt deutlich geringer aus.

Tab. 3.2: Lokale Klimadaten (Monat I, Temperatur T_i , relative Luftfeuchte F_i , Niederschlagsmenge P_i) der Station 662 (Braunschweig Völkenrode) des Deutschen Wetterdienstes gemittelt über den Zeitraum von Januar 1993 bis Dezember 2022 sowie des jeweils daraus berechneten Wasserdefizits B_i

Monat	I	T_i [°C]	F_i [%]	P_i [mm]	B_i [mm]
Januar	1	1,8	85,1	50,8	0,0
Februar	2	2,5	81,4	38,1	0,0
März	3	5,2	76,3	41,2	0,0
April	4	9,6	69,7	39,1	10,8
Mai	5	13,6	70,7	55,8	19,5
Juni	6	16,8	71,3	53,3	47,1
Juli	7	18,7	71,1	71,1	46,9
August	8	18,5	71,5	67,7	47,6
September	9	14,5	77,9	54,2	19,6
Oktober	10	10,4	82,8	52,0	0,0
November	11	5,8	86,3	45,5	0,0
Dezember	12	2,8	86,1	48,4	0,0
Jahr					191,5

3.1.2 Exposition durch Gammastrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment (Gammabodenstrahlung)

Die effektive Dosis $E_{U,r}$ eines Radionuklids r durch Aufenthalt auf Ufersedimenten im Bezugsjahr k ist gemäß der Berechnungsgrundlage nach

$$E_{U,r} = g_{b,r,eff} \cdot f_U \cdot t_A \cdot [f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}] \cdot O_{k,eff,r}^U \quad (5)$$

zu ermitteln, mit den Dosisleistungskoeffizienten $g_{b,r,eff}$ in $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, den dimensionslosen Anteilen f_r des Gamma-Emissionsspektrums oberhalb einer Energie von 0,2 MeV sowie die dimensionslosen Altersklassenfaktoren $c_{Geo,b1}$ und $c_{Geo,b2}$ zur Berücksichtigung der Körpergeometrie. Sofern in /BAZ 01/ tabelliert, wurden auch hier stets die Dosisleistungskoeffizienten verwendet, die der Entstehung von Tochternukliden Rechnung tragen. Hinsichtlich des Geometriefaktors wird zur oberen Abschätzung eine unendlich ausgedehnte, homogen kontaminierte Fläche entsprechend einem Wert von $f_U = 1$ veranschlagt. Die Aufenthaltsdauer $t_A = 760$ h an Ufersedimenten ist Tabelle 11 der Be-

rechnungsgrundlage /BASE 22/ entnommen und entstammt der Strahlenschutzverordnung /SSV 18/. Die flächenbezogene Aktivität im Ufersediment $O_{k,eff,r}^U$ bezüglich des Radionuklids r im Bezugsjahr k ist definiert nach

$$\frac{dO_{k,ri}(t)}{dt} = \dot{Q}_{U,k,ri} + \lambda_{ri-1} \cdot a_{ri-1,ri} \cdot O_{k,ri-1}(t) - \lambda_{ri} \cdot O_{k,ri}(t) \quad (6)$$

mit der flächenbezogenen Eintragsrate $\dot{Q}_{U,k,ri}$ des Radionuklids ri durch Sedimentation im Bezugsjahr k in $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, den physikalischen Zerfallskonstanten λ_{ri} in s^{-1} und den dimensionslosen Anteilen $a_{ri-1,ri}$ der Zerfälle des Nuklids $ri-1$, die das Nuklid ri als Zerfallsprodukt haben. Die Indizierung $ri-1$ kennzeichnet das Mutternuklid des Nuklids ri , sofern es Teil einer Zerfallsreihe ist. In Analogie zu Gleichung (2) kann auch Gleichung (6) als inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung unter Berücksichtigung der in /BASE 22/ genannten Randbedingungen mit einem Separationsansatz analytisch gelöst werden:

$$O_{ri}(t) = -\frac{\dot{Q}_{U,ri} + \lambda_{ri-1} \cdot a_{ri-1,ri} \cdot O_{k,ri-1}(t)}{\lambda_{ri}} \cdot e^{-\lambda_{ri} \cdot t} + \frac{\dot{Q}_{U,ri} + \lambda_{ri-1} \cdot a_{ri-1,ri} \cdot O_{k,ri-1}(t)}{\lambda_{ri}} \quad (7)$$

Zur Berechnung der effektiven Dosis $E_{U,r}$ wird die analytische Lösung (7) für die flächenbezogene Aktivität im Ufersediment $O_{k,eff,r}^U$ herangezogen. Auf eine Indizierung der Bezugsjahre wird im Folgenden auch hier verzichtet. Zur oberen Abschätzung der flächenbezogenen Aktivität im Ufersediment wird auch in diesem Fall der exponentiell abklingende erste Term in Gleichung (7) vernachlässigt und der konstante Term als oberer Grenzwert herangezogen.

Die flächenbezogene Eintragsrate durch Sedimentation berechnet sich für das Mutternuklid ($ri = 1$) nach

$$\dot{Q}_{U,ri} = \rho_{Se} \cdot v_{Se} \cdot \bar{C}_{ri}^{Sch} \quad (8)$$

mit der Dichte des Sediments $\rho_{Se} = 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ und der Sedimentationsgeschwindigkeit $v_{Se} = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Für andere als das jeweils betrachtete Nuklid der Zerfallsreihe ist gemäß /BASE 22/ $\dot{Q}_{U,ri} = 0$ anzusetzen. Die genannten Zahlenwerte gelten für kühlgemäßigtes Klima /BASE 22/. Schließlich erfordert Gleichung (8) noch die Berechnung der mittleren spezifischen Aktivität \bar{C}_{ri}^{Sch} des Radionuklids ri in Schwebstoffen in $Bq \cdot \text{kg}^{-1}$ Trockenmasse nach:

$$\bar{c}_r^{\text{Sch}} = \begin{cases} K_{\text{Se},r} \cdot [1 - e^{-\lambda_{\text{Anl},r} \cdot t_f}] \cdot c_r^{\text{W}} & \text{für } T_{\text{Anl},r} > 0 \\ K_{\text{Se},r} \cdot c_r^{\text{W}} & \text{für } T_{\text{Anl},r} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Darin ist $K_{\text{Se},r}$ der elementspezifische Konzentrationsfaktor des Radionuklids r für Schwebstoffe in $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\lambda_{\text{Anl},r}$ die elementspezifische Anlagerungskonstante des Radionuklids r an Schwebstoffe in s^{-1} und $T_{\text{Anl},r} = \ln(2) / \lambda_{\text{Anl},r}$ die elementspezifische Halbwertszeit für die Anlagerung des Radionuklids r an Schwebstoffe. Die Zahlenwerte sind in der Berechnungsgrundlage aufgeführt /BASE 22/ und entstammen der Strahlenschutzverordnung /SSV 18/. Nicht explizit aufgeführte Elemente werden zur oberen Abschätzung der Elementgruppe 3 mit den höchsten Halbwertszeiten bezüglich der Anlagerung an Schwebstoffe zugeordnet. Die Zeit t_f zwischen Eintritt des Radionuklids r in das Oberflächengewässer und der Entnahme des Wassers wird gemäß /BASE 22/ zu 5 Tagen veranschlagt. Den Berechnungen liegt die Annahme eines stehenden Gewässers zugrunde, das primär von Grundwasser gespeist wird, weshalb gemäß /BASE 22/ die gleiche Aktivitätskonzentration wie im Grundwasser angenommen werden darf. Die Aktivitätskonzentration c_r^{W} des Radionuklids r im Wasser wird für alle Nuklide mit der Einheitskonzentration von $1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ angesetzt. Aufgrund von Abschirmungseffekten trägt nur die oberste Sedimentschicht $U_r = 0,05 \text{ m}$ zur Exposition durch Gammabodenstrahlung bei /BASE 22/. Die effektive Zeitspanne, in der sich Aktivität in dieser Schicht anlagert, kann anhand ihrer Dicke und der Sedimentationsgeschwindigkeit abgeschätzt werden:

$$t_{\text{eff}} = \frac{U_r}{v_{\text{Se}}} \approx 2,38 \cdot 10^8 \text{ s} \approx 7,55 \text{ a} \quad (10)$$

Zur oberen Abschätzung wird t_{eff} in Gleichung (7) zur Berechnung von $O_{ri}(t)$ verwendet. Während der Zeit t_{eff} können angelagerte Radionuklide zerfallen und Tochternuklide aufgebaut werden. Dieser Prozess kann nur dann in signifikantem Ausmaß zur Dosis beitragen, wenn die Halbwertszeit des Mutternuklids nicht erheblich größer ist als t_{eff} und die Halbwertszeit des Tochternuklids nicht erheblich kürzer ist als t_{eff} . Die Konstellation der Halbwertszeiten muss also ermöglichen, dass innerhalb t_{eff} ein nennenswerter Anteil an Tochternukliden durch Zerfall der Mutternuklide aufgebaut wird, der im selben Zeitraum nicht wieder weitgehend zerfällt. Eine derartige Konstellation liegt bei den zu betrachtenden Nukliden nicht unmittelbar vor. Der Zerfall von Ac-227 mit einer Halbwertszeit von 21,8 a zu Th-227 mit einer Halbwertszeit von 18,7 d aus der Uran-Actinium-Reihe kommt dem beschriebenen Szenario am nächsten. In Abb. 3.1 ist ersichtlich, dass sich das radioaktive Gleichgewicht dieses Pärchens nach wenigen Monaten eingestellt

hat. Im Aktivitätsgleichgewicht beträgt die Stoffmenge des Tochternuklids aus dem Zerfall 0,24 % der Stoffmenge des Mutternuklids. Darüber hinaus sind die Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten für das Tochternuklid Th-227 gleich groß (Bodenstrahlung) oder aber für alle Altersklassen um Größenordnungen kleiner (Inhalation, Ingestion) als für das Mutternuklid Ac-227, so dass mit dem Zerfall von Ac-227 in Th-227 immer eine Verringerung der Dosis verbunden ist. Da Th-227 und Ac-227 zu den in der LZSA betrachteten Nukliden gehören, wird dem geringfügigen Aufbau von Th-227 durch Zerfall von Ac-227 gemäß Gleichung (7) zudem explizit Rechnung getragen. Eine ähnliche Konstellation der Halbwertszeiten weist das Mutter-Tochter-Pärchen Pb-210 (Halbwertszeit 22,2 a) und Bi-210 (Halbwertszeit 5 d) aus der Radium-Reihe auf, das ebenfalls explizit in der LZSA berücksichtigt wird. Für andere Nuklide aus den Zerfallsreihen sind die Halbwertszeiten des Mutternuklids entweder so groß, dass der Anteil aufgebauter Töchter um Größenordnungen kleiner ausfällt als im gewählten Beispiel, oder die Halbwertszeiten der Töchter so kurz, dass ein vollständiger Zerfall zu erwarten ist. Diese Betrachtungen lassen sich auf andere, kurz andauernde Transportprozesse auf anderen Expositionspfaden übertragen. Auf eine gesonderte Berücksichtigung des Zerfalls von Mutternukliden sowie des Aufbaus von Tochternukliden über die explizit betrachteten Nuklide hinaus wird deshalb im vorliegenden Bericht verzichtet.

Darüber hinaus berücksichtigt der Dosisleistungskoeffizient $g_{b,r,eff}$ aus Gleichung (5) für Tochternuklide eine 50 Jahre andauernde, kontinuierliche Ablagerung des Mutternuklids und die nach dieser Zeit vorliegenden Tochternuklide sowie Nuklidgemische /BAZ 01/.

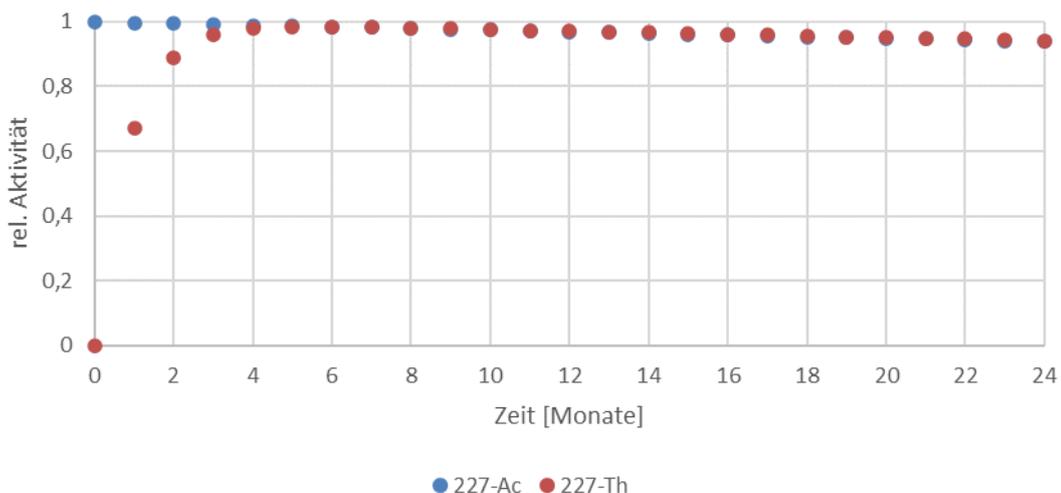


Abb. 3.1: Einfluss von radioaktivem Zerfall während Sedimentationsprozessen am Beispiel von Ac-227

3.2 Abschätzung der inneren Exposition

Zur inneren Exposition tragen sämtliche Pfade bei, auf denen gelöste Radionuklide in den Körper der repräsentativen Personen aufgenommen werden können (Abb. 3.2). Darunter fallen folgende Expositionspfade:

- Inhalation resuspendierter Staubpartikel mit der bodennahen Luft
- Ingestion kontaminierter Lebensmittel auf den Wegen:
 - Trinkwasser
 - Wasser – Fischfleisch (Süßwasserfisch)
 - Viehtränke – Kuh – Milch
 - Viehtränke – Rind – Fleisch
 - Bewässerung – Futterpflanze – Kuh – Milch
 - Bewässerung – Futterpflanze – Rind – Fleisch
 - Bewässerung – Pflanze/Blattgemüse
 - Boden – Futterpflanze – Kuh – Milch
 - Boden – Futterpflanze – Rind – Fleisch
 - Boden – Pflanze
 - Muttermilch/Milchfertigprodukte (betrifft nur Altersklasse < 1 a)
- Unbeabsichtigte Ingestion kontaminierten Bodens beim Aufenthalt im Freien

Für die Berechnung der Beiträge durch Ingestion kontaminierter Lebensmittelpfade sind die in /BASE 22/ aufgeführten jährlichen Verzehrsmengen heranzuziehen. Zur Berechnung der Gesamtdosis ist zudem für jede Altersklasse der dosisdominierende Lebensmittelpfad zu identifizieren und mit dem in /BASE 22/, Anhang A4.1, Tabelle 9, Spalte 8 aufgeführten Gewichtungsfaktor zu multiplizieren. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dem 95. Perzentil der jeweiligen Verzehrsmengen Rechnung zu tragen.

Die Ergebnisse der berechneten Dosisbeiträge jedes Radionuklids zur inneren Exposition aller Altersklassen sind den Tab. A.2 bis Tab. A.7 jeweils ab Spalte fünf zu entnehmen.

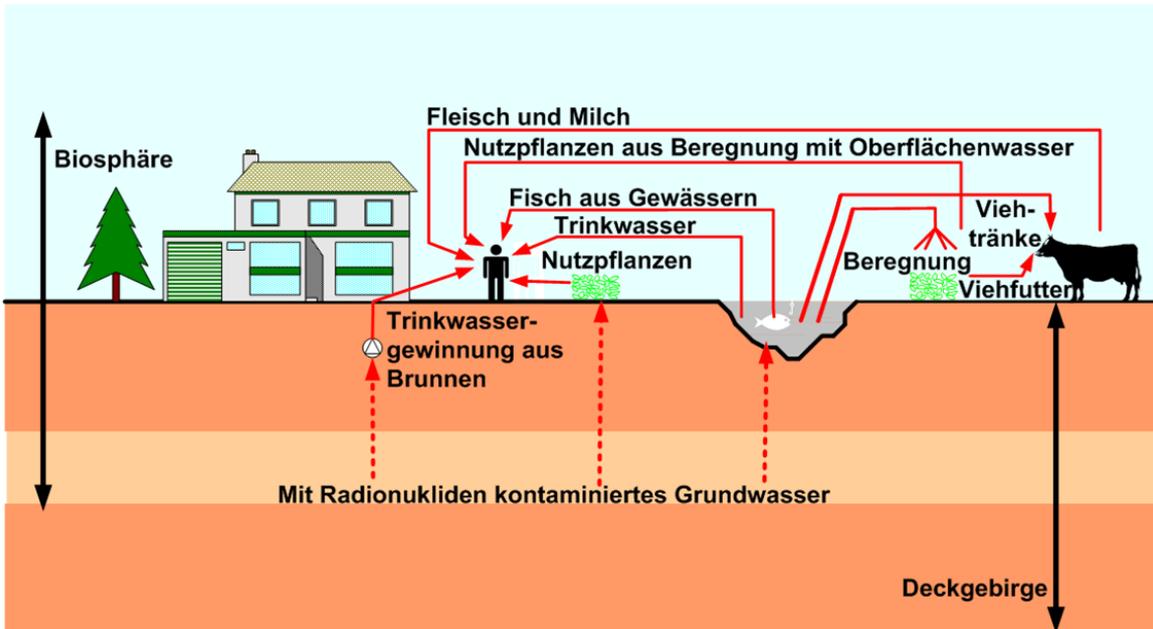


Abb. 3.2 Nutzungs- und Ingestionspfade bei der Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre

3.2.1 Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)

Radionuklide in Partikeln resuspendierten Staubs können von der repräsentativen Person mit der Atemluft inhaled werden und liefern somit einen Beitrag zur jährlichen Dosis. Die Dosis durch Inhalation bezüglich des Radionuklids r berechnet sich nach

$$E_{h,r} = \bar{C}_r^L \cdot \dot{V} \cdot t_{1a} \cdot g_{h,r,eff} \quad (11)$$

aus dem Jahresmittel der Aktivitätskonzentration \bar{C}_r^L des Nuklids r in der bodennahen Luft in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, der Atemrate \dot{V} in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, die für die verschiedenen Altersgruppen in Tabelle 10 des Anhangs A4 der Berechnungsgrundlage /BASE 22/ dargestellt und der Strahlenschutzverordnung /SSV 18/ entnommen ist sowie dem Dosiskoeffizienten für die effektive Folgedosis durch Inhalation $g_{h,r,eff}$, der gemäß /SSV 18/ der Beilage des Bundesanzeigers Nr. 160a und b vom 28. August 2001 /BAZ 01/ zu entnehmen ist. Die Dauer eines Jahres wird mit $t_{1a} = 31.557.600 \text{ s}$ entsprechend 365,25 Tagen angesetzt.

Die Aktivitätskonzentration \bar{C}_r^L des Nuklids r in der bodennahen Luft durch resuspendierten Staub ist nach

$$\bar{C}_r^L = AF_{20\mu\text{m},r} \cdot C_r^{\text{Bo}} \cdot S_{\text{St}} \quad (12)$$

zu berechnen. Der Aufkonzentrierungsfaktor $AF_{20\mu\text{m},r}$ beschreibt das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität der Staubfraktion mit einer Partikelgröße unterhalb von $20 \mu\text{m}$ zur spezifischen Aktivität im gesamten ungesiebten Oberboden C_r^{Bo} bezüglich des Radionuklids r und ist für kühlgemäßigtes Klima mit 4 anzusetzen /BASE 22/. Für die Staubkonzentration in der bodennahen Luft S_{St} wird in Bezug auf die Bodentrockenmasse ein Wert von $5 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ für kühlgemäßigtes Klima angesetzt. Die spezifische Aktivität C_r^{Bo} im ungesiebten Oberboden in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ergibt sich aus der flächenbezogenen Aktivität $B_{ri}(t)$ im Wurzelbereich gemäß der Gleichungen (2) und (3) sowie der Flächentrockenmasse p^{Bo} des Bodens in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ nach:

$$C_r^{\text{Bo}} = \frac{B_{ri}(t_{1a})}{p^{\text{Bo}}} \quad (13)$$

Als obere Abschätzung wird für die Flächentrockenmasse von Weideboden mit dem geringsten Wert von $p^{\text{Bo}} = p^{\text{Wd}} = 120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ gemäß /BASE 22/ ausgegangen, der die höchste spezifische Aktivität im ungesiebten Oberboden nach sich zieht. Für die flächenbezogene Aktivität im Wurzelbereich wird der konstante Term aus Gleichung (3) veranschlagt.

3.2.2 Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch (Ingestion)

Der Verzehr mit radioaktiven Stoffen kontaminierter Lebensmittel führt zu einer inneren Exposition der repräsentativen Person. Dies beinhaltet auch eine Belastung der Muttermilch als Bestandteil der Ernährung des Säuglings für die Altersklasse $\leq 1 \text{ a}$. Im Folgenden wird die Berechnung der einzelnen Beiträge dargelegt. Dekontaminationseffekte bei lebensmitteltechnologischen und haushaltsmäßigen Zubereitungsmethoden werden nicht berücksichtigt. Die Gesamtdosis für die Ingestion von Lebensmitteln wird in Kapitel 3.2.2.8 thematisiert.

3.2.2.1 Trinkwasser

Die Dosis bezüglich des Radionuklids r durch den Verzehr von Trinkwasser beträgt

$$E_{\text{TW},r} = f_{\text{TW}} \cdot U^{\text{TW}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{TW}} \cdot g_{g,r,\text{eff}} \quad (14)$$

mit dem dimensionslosen Anteil $f_{\text{TW}} = 1$ für den Anteil des konsumierten Trinkwassers, der infolge des Eintrags aus dem Endlager kontaminiert ist. Dahinter steht die Annahme, dass die repräsentative Person ausschließlich kontaminiertes, lokales Grundwasser als Trinkwasser zu sich nimmt, das nicht weiter behandelt oder verdünnt wird. Zudem gehen die jährliche Verzehrsmenge der betrachteten Altersgruppe U^{TW} in L nach Anhang 4 Tabelle 9 /BASE 22/ und Anlage 11 Teil B StrSchV /SSV 18/ sowie die spezifische Aktivität \hat{C}_r^{TW} des Radionuklids r im Trinkwasser ein, die mit dem Einheitswert von $1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ angesetzt wird. Der Dosiskoeffizient für Ingestion $g_{g,r,\text{eff}}$ ist in der Einheit $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ angegeben und /BAZ 01/ zu entnehmen.

3.2.2.2 Süßwasserfisch

Der Dosisbeitrag bezüglich des Radionuklids r durch den Verzehr von Süßwasserfisch berechnet sich nach

$$E_{\text{Fi},r} = f_{\text{Fi}} \cdot U^{\text{Fi}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Fi}} \cdot g_{g,r,\text{eff}} \quad (15)$$

mit dem dimensionslosen Anteil $f_{\text{Fi}} = 0,5$ der Menge an konsumiertem Fisch aus lokaler Erzeugung, der infolge des Eintrags aus dem Endlager kontaminiert ist, der jährlichen Verzehrsmenge der betrachteten Altersgruppe U^{Fi} in kg nach Anhang 4 Tabelle 9 /BASE 22/ und Anlage 11 Teil B StrSchV /SSV 18/ sowie der spezifischen Aktivität \tilde{C}_r^{Fi} des Radionuklids r im Süßwasserfisch in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ zum Zeitpunkt des Verzehrs. Der Dosiskoeffizient für Ingestion $g_{g,r,\text{eff}}$ ist in der Einheit $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$ angegeben und /BAZ 01/ zu entnehmen. Die spezifische Aktivität im Süßwasserfisch ergibt sich aus der Aktivitätskonzentration $C_r^{\text{W}} = 1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ des Radionuklids r im Wasser und dem Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} beim Transfer des Radionuklids r vom Wasser in Süßwasserfisch:

$$\tilde{C}_r^{\text{Fi}} = C_r^{\text{W}} \cdot T_r^{\text{Fi}} \quad (16)$$

Die Zahlenwerte für T_r^{Fi} sind entsprechend der in Anhang A3 Tabelle 8 /BASE 22/ bzw. StrSchV /SSV 18/ angeführten Daten gewählt.

3.2.2.3 Pflanzliche Nahrungsmittel

Der Verzehr pflanzlicher Lebensmittel außer Blattgemüse führt zu einem Dosisbeitrag von

$$E_{\text{Pf},r} = f_{\text{Pf}} \cdot U^{\text{Pf}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Pf}} \cdot g_{\text{g},r,\text{eff}} \quad (17)$$

mit dem dimensionslosen Anteil $f_{\text{Pf}} = 0,5$ der Menge an verzehrten pflanzlichen Lebensmitteln aus lokaler Erzeugung, der infolge des Eintrags aus dem Endlager kontaminiert ist, der jährlichen Verzehrsmenge der betrachteten Altersgruppe U^{Pf} in kg nach Anhang 4 Tabelle 9 /BASE 22/ und Anlage 11 Teil B StrSchV /SSV 18/, der spezifischen Aktivität \tilde{C}_r^{Pf} des Radionuklids r in pflanzlichen Nahrungsmitteln in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ zum Zeitpunkt des Verzehrs und dem Dosiskoeffizienten für Ingestion $g_{\text{g},r,\text{eff}}$ in $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$. Die Bewässerung von Pflanzen hat bezüglich des Radionuklids r die Anlagerung der spezifischen Aktivität auf und in der Pflanze gemäß

$$\tilde{C}_r^{\text{Pf}} = W \cdot \bar{C}_r^{\text{W}} \cdot f_{\text{W}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{\text{V}} \cdot t_{\text{W}}^{\text{Pf}}}}{Y^{\text{Pf}} \cdot \lambda_{\text{V}}} + C_r^{\text{Bo}} \cdot T_r^{\text{Pf}} \quad (18)$$

zur Folge. Der erste Term repräsentiert die Kontamination durch direkt auf der Pflanze abgelagerte Aktivität mit der jährlichen Bewässerungsrate W gemäß Gleichung (4), der Aktivitätskonzentration von $\bar{C}_r^{\text{W}} = C_r^{\text{W}} = 1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ des Wassers, dem Anteil $f_{\text{W}} = 0,3$ der auf den Pflanzen abgelagerten Aktivität für kühlgemäßigtes Klima, der Verweilkonstante $\lambda_{\text{V}} = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ für den Verbleib von Radionukliden auf der Pflanze für kühlgemäßigtes Klima, der Zeit $t_{\text{W}}^{\text{Pf}} = 5,2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ entsprechend 60 Tagen, während der Pflanzen in der Wachstumsperiode infolge Bewässerung oberirdisch kontaminiert werden sowie der Bewuchsdichte $Y^{\text{Pf}} = 2,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ /BASE 22/. Der zweite Term beschreibt die über die Wurzeln aufgenommene Aktivität C_r^{Bo} in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ im ungesiebten Oberboden (Weideboden) nach Gleichung (13) mit dem Transferfaktor T_r^{Pf} in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse pro $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Trockenboden. Die Zahlenwerte für T_r^{Pf} sind in Anhang A3 Tabelle 5 /BASE 22/ aufgeführt. Abweichend von /BASE 22/ wird in Gleichung (18) auf die Indizierung der Bezugsjahre verzichtet. Wie in Kap. 3.1.1 dargelegt, wird als obere Abschätzung nur der konstante Term in Gleichung (3) zur Bestimmung von C_r^{Bo} herangezogen. Die Indizierung des Bezugsjahres k wird in Anlehnung an /BASE 22/ mitgeführt, ist aber ohne praktische Bedeutung. Für die Berechnung des Dosisbeitrags durch pflanzliche Nahrungsmittel sind die in /BASE 22/ und /SSV 18/ aufgeführten Verzehrsmengen der betrachteten Altersgruppe für Getreide, Getreideprodukte, einheimisches Frischobst, Obstprodukte, Säfte,

Kartoffeln, Wurzelgemüse, Gemüse und Gemüseprodukte jeweils für jede Altersklasse zusammenzufassen.

3.2.2.4 Blattgemüse

Der Dosisbeitrag bezüglich des Radionuklids r durch den Verzehr von Blattgemüse wird separat ermittelt und berechnet sich nach

$$E_{Bl,r} = f_{Bl} \cdot U^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} \cdot g_{g,r,eff} \quad (19)$$

mit dem dimensionslosen Anteil $f_{Bl} = 0,5$ der Menge an verzehrtem Blattgemüse aus lokaler Erzeugung, der infolge des Eintrags aus dem Endlager kontaminiert ist, der jährlichen Verzehrsmenge der betrachteten Altersgruppe U^{Bl} in kg nach Anhang 4 Tabelle 9 /BASE 22/ und Anlage 11 Teil B StrSchV /SSV 18/ sowie der spezifischen Aktivität \tilde{C}_r^{Bl} des Radionuklids r im Blattgemüse in $Bq \cdot kg^{-1}$ zum Zeitpunkt des Verzehrs. Analog zur Kontamination übriger pflanzlicher Nahrungsmittel gemäß Gleichung (18) berechnet sich die spezifische Aktivität nach:

$$\tilde{C}_r^{Bl} = W \cdot \bar{C}_r^W \cdot f_W \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_V \cdot t_W^{Bl}}}{Y^{Bl} \cdot \lambda_V} + C_r^{Bo} \cdot T_r^{Bl} \quad (20)$$

Für Blattgemüse sind die entsprechenden Parameter $t_W^{Pf} = 5,2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, $Y^{Bl} = 1,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ sowie die Zahlenwerte für T_r^{Bl} gemäß Anhang A3 Tabelle 5 /BASE 22/ zu verwenden. Abweichend von /BASE 22/ wird auf eine Indizierung der Bezugsjahre verzichtet.

3.2.2.5 Milch und Milchprodukte

Der Verzehr von Milch und Milchprodukten führt zu einem Dosisbeitrag von

$$E_{Mi,r} = f_{Mi} \cdot U^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} \cdot g_{g,r,eff} \quad (21)$$

mit dem dimensionslosen Anteil $f_{Mi} = 0,5$ der Menge an verzehrter Milch aus lokaler Erzeugung, die infolge des Eintrags aus dem Endlager kontaminiert ist, der jährlichen Verzehrsmenge der betrachteten Altersgruppe U^{Mi} in kg nach Anhang 4 Tabelle 9 /BASE 22/ und Anlage 11 Teil B StrSchV /SSV 18/ und der spezifischen Aktivität \tilde{C}_r^{Mi} des Radionuklids r in Milch und Milchprodukten in $Bq \cdot kg^{-1}$ zum Zeitpunkt des Verzehrs und dem Dosiskoeffizienten für Ingestion $g_{g,r,eff}$ in $Sv \cdot Bq^{-1}$. Die spezifische Aktivität ist nach

$$\tilde{C}_r^{Mi} = (C_r^W \cdot L + C_r^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu}) \cdot T_r^{Mi} \quad (22)$$

zu berechnen. Darin beschreibt der erste Term den Beitrag durch kontaminiertes Tränkwasser mit der Aktivitätskonzentration $C_r^W = 1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ des Wassers, dem täglichen Wasserkonsum des Rinds $L = 100 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ für kühlgemäßigtes Klima /BASE 22/ sowie dem elementspezifischen Transferfaktor T_r^{Mi} vom Tränkwasser in die Milch in der Einheit $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$ gemäß Anhang A3 Tabelle 5 /BASE 22/. Der zweite Term beschreibt den Beitrag durch kontaminiertes Futter (Weidebewuchs) mit der spezifischen Aktivität C_r^{Fu} des Radionuklids r in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse, der täglichen Futterraufnahme von $\dot{M}_{Fu} = 70 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ für kühlgemäßigtes Klima /BASE 22/ und dem Transferfaktor T_r^{Mi} , der auch den Übergang vom Weidefutter in die Milch abbildet. Die spezifische Aktivität des Futters C_r^{Fu} ist gemäß /BASE 22/ mit der spezifischen Aktivität von Weidebewuchs \hat{C}_r^{Wd} gleichzusetzen und berechnet sich in Analogie zu pflanzlichen Lebensmitteln in Gleichung (18) und Blattgemüse in Gleichung (20) gemäß

$$C_r^{Fu} = \tilde{C}_r^{Wd} = W \cdot \bar{C}_r^W \cdot f_W \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_V \cdot t_W^{Wd}}}{Y^{Wd} \cdot \lambda_V} + C_r^{Bo} \cdot T_r^{Wd} \quad (23)$$

Für Weidepflanzen sind hierbei die entsprechenden Parameter $t_W^{Wd} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ entsprechend 30 Tagen, $Y^{Wd} = 0,85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ sowie die Zahlenwerte für T_r^{Wd} gemäß Anhang A3 Tabelle 5 /BASE 22/ zu verwenden. Anders als in /BASE 22/ wird von einer Indizierung der Bezugsjahre abgesehen. Beim Verzehr von Lagerfutter (Weidebewuchs aus Ernte) im Winter erfolgt kein Aufbau von für die Dosisberechnung relevanten Tochternukliden, so dass hier die gleiche Kontamination wie für frisches Weidefutter angenommen wird.

3.2.2.6 Fleisch und Fleischwaren

Der Dosisbeitrag durch den Verzehr von Fleisch und Fleischwaren, zu denen auch Wurst sowie Eier zu zählen sind, berechnet sich nach

$$E_{Fl,r} = f_{Fl} \cdot U^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} \cdot g_{g,r,eff} \quad (24)$$

mit dem dimensionslosen Anteil $f_{Fl} = 0,5$ der Menge an verzehrtem Fleisch aus lokaler Erzeugung, das infolge des Eintrags aus dem Endlager kontaminiert ist, der jährlichen Verzehrsmenge der betrachteten Altersgruppe U^{Fl} in kg nach Anhang 4 Tabelle 9 /BASE 22/ und Anlage 11 Teil B StrSchV /SSV 18/, der spezifischen Aktivität \tilde{C}_r^{Fl} des

Radionuklids r in Fleisch und Fleischwaren in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ zum Zeitpunkt des Verzehrs und dem Dosiskoeffizienten für Ingestion $g_{g,r,\text{eff}}$ in $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$. Die spezifische Aktivität ist gemäß

$$\tilde{C}_r^{\text{Fl}} = (C_r^{\text{W}} \cdot L + C_r^{\text{Fu}} \cdot \dot{M}_{\text{Fu}}) \cdot T_r^{\text{Fl}} \quad (25)$$

zu bestimmen. Wie auch bei der Kontamination von Milch und Milchprodukten (Kapitel 3.2.2.5) repräsentiert der erste Term den Beitrag durch kontaminiertes Tränkwasser und der zweite Term den Beitrag durch kontaminiertes Weidefutter. Für Fleisch und Fleischwaren ist der Transferfaktor T_r^{Fl} gemäß Anhang A3 Tabelle 5 /BASE 22/ anzusetzen.

3.2.2.7 Muttermilch

Für die Altersklasse ≤ 1 a ist der Verzehr von Muttermilch zu berücksichtigen. Durch Inhalation und Ingestion können Radionuklide in den Körper der stillenden Mutter aufgenommen werden und zu einer Kontamination der Muttermilch führen. Nicht für alle Radionuklide stehen Dosiskoeffizienten zur Verfügung, welche die Kontamination der Muttermilch bei Inhalation oder Ingestion durch die stillende Mutter beschreiben, weshalb eine Fallunterscheidung vorzunehmen ist. Bei gegebenen Dosiskoeffizienten $g_{g,r,\text{eff}}^{\text{MM}}$ für Ingestion und $g_{h,r,\text{eff}}^{\text{MM}}$ für Inhalation des Radionuklids r errechnet sich der Dosisbeitrag für kontaminierte Muttermilch nach

$$E_{\text{MM},r} = A_r^{g;1a} \cdot g_{g,r,\text{eff}}^{\text{MM}} + A_r^{h;1a} \cdot g_{h,r,\text{eff}}^{\text{MM}} \quad (26)$$

mit der Aktivität $A_r^{g;1a}$, die jährlich durch Ingestion sowie der Aktivität $A_r^{h;1a}$, die jährlich durch Inhalation von der stillenden Mutter aufgenommen wird. Die Dosiskoeffizienten sind in Anhang A2, Tabelle 4 von /BASE 22/ aufgeführt. Die von der stillenden Mutter durch Ingestion aufgenommene Aktivität bezüglich des Radionuklids r berechnet sich zu

$$A_r^{g;1a} = f_{\text{TW}} \cdot U_{>17a}^{\text{TW}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{TW}} + f_{\text{Fi}} \cdot U_{>17a}^{\text{Fi}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Fi}} + f_{\text{Pf}} \cdot U_{>17a}^{\text{Pf}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Pf}} + f_{\text{Bl}} \cdot U_{>17a}^{\text{Bl}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Bl}} \quad (27)$$

$$+ f_{\text{Mi}} \cdot U_{>17a}^{\text{Mi}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Mi}} + f_{\text{Fl}} \cdot U_{>17a}^{\text{Fl}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{Fl}}$$

mit den bereits erläuterten Beiträgen und Parametern der verschiedenen Lebensmittelpfade. Die jeweiligen Verzehrsmengen U beziehen sich auf die Altersklasse der Erwachsenen (> 17 a). Die durch Inhalation aufgenommene Aktivität der stillenden Mutter errechnet sich nach

$$A_r^{h:1a} = \bar{C}_r^L \cdot \dot{V}_{>17a} \cdot t_{1a} \quad (28)$$

mit den in Kapitel 3.2 beschriebenen Parametern. Für Radionuklide ohne bekannte Dosiskoeffizienten berechnet sich der Dosisbeitrag durch den Verzehr von Muttermilch gemäß

$$E_{MM,r} = \frac{1}{365 \cdot a_d} (A_r^{g:1a} \cdot T_r^{MM,g} + A_r^{h:1a} \cdot T_r^{MM,h}) \cdot U^{MM} \cdot g_{g,r,eff} \quad (29)$$

in $Sv \cdot a^{-1}$ mit den bereits erläuterten Parametern sowie der Dauer eines Tages $a_d = 1$ d, den Transferfaktoren T_r^{MM} von Lebensmitteln und $T_r^{MM,h}$ von Atemluft in die Muttermilch in $d \cdot kg^{-1}$ gemäß Anhang A3 Tabelle 6 /BASE 22/, der jährlichen Verzehrsmenge $U^{MM} = 200$ L sowie dem Dosiskoeffizienten für Ingestion $g_{g,r,eff}$ in $Sv \cdot Bq^{-1}$.

Alternativ ist das Szenario zu betrachten, dass ein Säugling jährlich anstatt 200 L Muttermilch die gleiche Menge an Milchersatzprodukten konsumiert. Dazu ist anzunehmen, dass pro L Milchersatzprodukt 0,2 kg Konzentrat in 0,8 L Trinkwasser zubereitet werden. In diesem Fall sind auf die jährliche Verzehrsmenge an Trinkwasser zusätzlich 160 L aufzuschlagen und die damit einhergehende zusätzliche Dosis nach Gleichung (14) zu berechnen. Für jedes Radionuklid werden beide möglichen Ernährungsgewohnheiten für Säuglinge berechnet. Ohne Kenntnis der einzelnen Nuklidbeiträge zur Aktivitätskonzentration des Grundwassers ist die Angabe eines abdeckenden Dosisbeitrags der Muttermilch nicht möglich. Zur oberen Abschätzung geht daher für jedes Nuklid jeweils der höhere Beitrag in die Berechnung der Gesamtdosis ein. In Spalte zehn der Tab. A.2 sind die Werte jener Nuklide fett hervorgehoben, in denen der Verzehr von Muttermilch einen höheren Dosisbeitrag nach sich zieht. Die Werte der übrigen Nuklide sind dementsprechend auf einen höheren Dosisbeitrag durch den Verzehr von Milchfertigprodukten zurückzuführen.

3.2.2.8 Gesamtdosis durch Aufnahme radioaktiver Stoffe beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch

Zur Berechnung der Gesamtdosis durch Ingestion von Lebensmitteln und Muttermilch ist zunächst nuklidspezifisch die Lebensmittelgruppe zu identifizieren, die bei den jährlichen Verzehrsmengen den höchsten Beitrag zur Ingestionsdosis einer Altersgruppe liefert. Zur Berücksichtigung des 95. Perzentils ist die betroffene Verzehrsmenge mit dem zugehörigen Faktor aus Anhang A4.1 Tabelle 9 /BASE 22/ bzw. Anlage 11 Teil B

StrSchV /SSV 18/ zu multiplizieren. Diese Gewichtung ist nach der Auswertung der Beiträge der Lebensmittelgruppen und vor der Berechnung der Gesamtdosis durch Ingestion aller Lebensmittel vorzunehmen und findet keine explizite Berücksichtigung in den in /BASE 22/ angegebenen Gleichungen. Alle pflanzlichen Lebensmittel bis auf Blattgemüse sind zur Ermittlung der dosisdominierenden Lebensmittelgruppe zusammenzufassen, weisen jedoch keinen einheitlichen Multiplikator auf. Daher ist es pragmatisch, mit dem effektiven Multiplikator für pflanzliche Lebensmittel

$$M_{Pf} = \frac{2 \cdot U_{Gt} + 3 \cdot (U_O + U_{K,W} + U_{Gm})}{U_{Gt} + U_O + U_{K,W} + U_{Gm}} \quad (30)$$

zu rechnen. Darin sind U_{Gt} , U_O , $U_{K,W}$ und U_{Gm} die jährlichen Verzehrsmengen nach Anhang A4.1 Tabelle 9 /BASE 22/ für Getreide und Getreideprodukte (U_{Gt}), für Frischobst, Obstprodukte, Säfte (U_O), für Kartoffeln, Wurzelgemüse, Säfte ($U_{K,W}$) und Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte (U_{Gm}) sowie die Faktoren 2 und 3 die jeweiligen Multiplikatoren. Aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisse der einfließenden Verzehrsmengen variiert der effektive Gewichtungsfaktor für die Altersgruppe zwischen 2,5 und 3. Diese Methodik erlaubt es, den effektiven Gewichtungsfaktor auf die gesamte Gruppe pflanzlicher Lebensmittel anzuwenden, was die erforderlichen Zwischenschritte zur Ermittlung der gesamten Ingestionsdosis reduziert. Zur oberen Abschätzung wird für jedes Nuklid einzeln die dosisdominierende Lebensmittelgruppe gewichtet und zur Berechnung der Gesamtdosis veranschlagt. Die dosisdominierenden Lebensmittelgruppen sind in den Tab. A.2 bis Tab. A.7 nuklidspezifisch farblich hervorgehoben. Die Gesamtdosis durch Ingestion von Lebensmitteln für alle Altersklassen > 1 a berechnet sich dann nach

$$\begin{aligned} E_{g,r} &= (f_{Tw} \cdot U^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} \\ &\quad + f_{Mi} \cdot U^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl}) \cdot g_{g,r,eff} \quad (31) \\ &= E_{Tw,r} + E_{Fi,r} + E_{Pf,r} + E_{Bl,r} + E_{Mi,r} + E_{Fl,r} \end{aligned}$$

in der Einheit $Sv \cdot a^{-1}$ mit den bereits dargelegten eingehenden Größen.

Für die Altersklasse ≤ 1 a beträgt die Gesamtdosis der Ingestion

$$\begin{aligned}
 E_{g,r} = & \left(f_{Tw} \cdot U_{\leq 1a}^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} \right. \\
 & + f_{Mi} \cdot U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} \left. \right) \cdot g_{g,r,eff} + A_r^{g;1a} \cdot g_{g,r,eff}^{MM} \\
 & + A_r^{h;1a} \cdot g_{h,r,eff}^{MM}
 \end{aligned} \quad (32)$$

in $Sv \cdot a^{-1}$ für alle Nuklide mit verfügbaren Dosiskoeffizienten $g_{g,r,eff}^{MM}$ und $g_{h,r,eff}^{MM}$ sowie den bereits erläuterten übrigen Größen. Für alle Nuklide ohne tabellierte Dosiskoeffizienten ist die Gesamtdosis der Ingestion dieser Altersklasse nach

$$\begin{aligned}
 E_{g,r} = & \left(f_{Tw} \cdot U_{\leq 1a}^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} \right. \\
 & + f_{Mi} \cdot U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} \\
 & \left. + \frac{1}{365 \cdot a_d} [A_r^{g;1a} \cdot T_r^{MM,g} + A_r^{h;1a} \cdot T_r^{MM,h}] \cdot U^{MM} \right) \cdot g_{g,r,eff}
 \end{aligned} \quad (33)$$

mit den bereits beschriebenen Größen zu berechnen.

3.2.3 Exposition durch Aufnahme kontaminierten Bodens über den Mund (Bodeningestion)

Die unbeabsichtigte Aufnahme kontaminierten Bodens bei Aufenthalt auf kontaminierten Flächen im Freien führt zu einem zusätzlichen Beitrag zur inneren Exposition der repräsentativen Person. Die Jahresdosis bezüglich des Radionuklids r beträgt

$$E_{g,r}^{Bo} = AF_{500\mu m,r} \cdot C_r^{Bo} \cdot U^{Bo} \cdot g_{g,r,eff} \quad (34)$$

mit dem dimensionslosen Aufkonzentrierungsfaktor in dem Bodenanteil mit einer Partikelgröße $< 500 \mu m$ $AF_{500\mu m,r} = 2$ für kühlgemäßigtes Klima /BASE 22/, der jährlich mit dem Mund aufgenommenen Bodenmenge U^{Bo} in kg gemäß Tabelle 3 /BASE 22/ sowie dem Dosiskoeffizienten für Ingestion $g_{g,r,eff}$ in $Sv \cdot Bq^{-1}$. Für die spezifische Aktivität im ungesiebten Oberboden C_r^{Bo} in $Bq \cdot kg^{-1}$ ist nach /BASE 22/ gemäß Gleichung (13) entweder Weideboden oder Ackerboden anzusetzen. Da Weideboden eine geringere Flächentrockenmasse aufweist und eine stärkere Aufkonzentration von Nukliden nach sich zieht, wird abdeckend mit dem Wert für Weideboden $C_r^{Bo} = C_r^{Wd}$ gerechnet (vgl. Kap. 3.2.1).

3.3 Abschätzung der Gesamtdosis

Die Gesamtdosis berechnet sich durch Summation aller Beiträge durch externe Strahlung, Inhalation, Ingestion von Lebensmitteln und Muttermilch mit Gewichtung der dosisdominierenden Lebensmittelgruppe sowie der Ingestion von Boden. Für den Beitrag durch externe Strahlung wird bezüglich der Aufenthaltsdauern außerhalb von Gebäuden als ungünstigere Variante das Szenario veranschlagt, in der sich die repräsentative Person 1.000 h auf berechneten Böden (Kap. 3.1.1) und 760 h auf Ufersedimenten (Kap. 3.1.2) aufhält.

Die Dosiskonversionsfaktoren der einzelnen Expositionspfade sowie der Gesamtdosis sind für alle Altersklassen in Anlage A zusammengefasst.

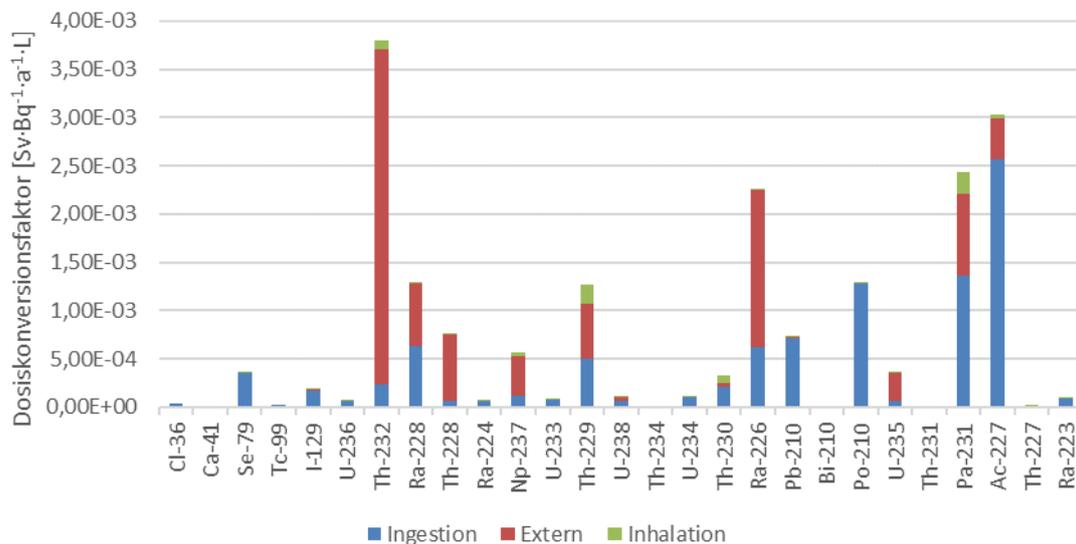


Abb. 3.3 Nuklidspezifische Aufschlüsselung der einzelnen Dosiskonversionsfaktoren der Altersklasse > 17 a

Die einzelnen Dosisbeiträge durch Ingestion (inkl. Boden), externe Strahlung und Inhalation sind in Abb. 3.3 beispielhaft für die Altersklasse > 17 a für alle betrachteten Nuklide grafisch dargestellt. Relevante Beiträge von externer Strahlung zur Gesamtdosis sind insbesondere bei den meisten Thorium- und Radium-Isotopen sowie bei Np-237, U-235, Pa-231 und Ac-227 zu verzeichnen. Dies lässt sich auf die vergleichsweise hohen Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung dieser Nuklide zurückführen, in denen auch die Gamma-Übergänge der Tochternuklide berücksichtigt sind. Tochternuklide, deren Beiträge die Dosisleistungskoeffizienten ihrer Mutternuklide dominieren, sind typischerweise kurzlebig (z. B. Ac-228 mit einer Halbwertszeit von etwa

6 h als Tochter von Th-232) und gehören somit nicht zur betrachteten Radionuklid Auswahl, weshalb ihre Dosisbeiträge nicht doppelt gezählt werden.

Für die meisten Nuklide ist hingegen der Verzehr kontaminierter Lebensmittel dosisdominierend.

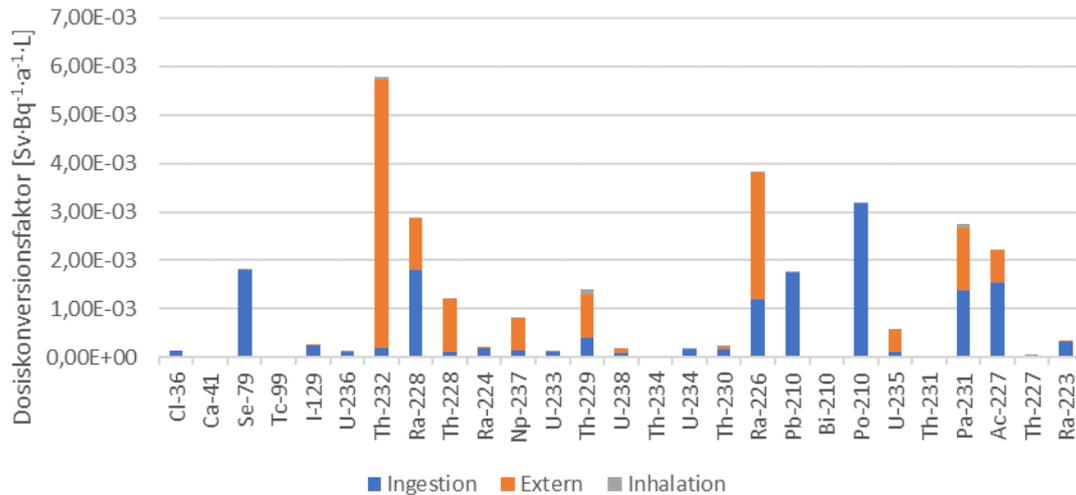


Abb. 3.4 Nuklidspezifische Aufschlüsselung der einzelnen Dosiskonversionsfaktoren der Altersklasse 1 - 2 a

In Abb. 3.4 sind die nuklidspezifischen Dosisbeiträge durch Ingestion (inkl. Boden), externe Strahlung und Inhalation für die Altersgruppe 1 – 2 a dargestellt. Auch hier sind für die meisten Thorium- und Radium-Nuklide sowie für Np-237, U-235, Pa-231 und Ac-227 signifikante Beiträge durch externe Strahlung aufgrund verhältnismäßig hoher Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung zu verzeichnen. Für die übrigen Nuklide dominieren die Beiträge durch den Verzehr kontaminierter Lebensmittel die Gesamtdosis.

Abb. 3.5 zeigt die Aufschlüsselung einer über die Lebenszeit von 70 Jahren kumulierten Dosis auf die einzelnen Lebensabschnitte. Für alle betrachteten Nuklide wird der größte Dosisbeitrag im Erwachsenenalter aufgenommen, was auch auf die Anzahl der in dieser Altersklasse verbrachten Lebensjahre zurückgeführt werden kann, die größer als für alle anderen Altersklassen ausfällt.

Zum Vergleich mit der berechneten Strahlenexposition aus dem Jahr 1991 nach der damals gültigen AVV lassen sich aus den in /PRO 91/ aufgeführten Nuklidkonzentrationen

und effektiven Dosen radionuklidspezifische Dosiskonversionsfaktoren für die Langzeitsicherheitsanalyse Konrad ableiten⁴. In Abb. 3.6 ist der Quotient der im Rahmen dieses Berichts ermittelten Dosiskonversionsfaktoren und der aus /PRO 91/ abgeleiteten Werte für die Altersklasse > 17 a dargestellt, Abb. 3.7 zeigt die gleiche Auftragung für die Altersklasse der 1 – 2 a. In dieser Auftragung fällt das Delta umso kleiner aus, je näher der Quotient beider Größen bei 1 liegt. Für die meisten Nuklide ist ein Rückgang der neu berechneten Dosiskonversionsfaktoren beider Altersgruppen zu verzeichnen. Am ehesten sind die dargestellten Veränderungen auf die angepassten Ernährungsgewohnheiten sowie auf Aktualisierungen der Dosis- und Transferfaktoren zurückzuführen. Anders als in den Dosisberechnungen in /PRO 91/ nach den damals gültigen Vorschriften ist gemäß /BASE 22/ zu berücksichtigen, dass die meisten Lebensmittelgruppen nur noch zu 50 % aus lokaler Erzeugung stammen und infolge eines Austrags aus dem Endlager mit Radionukliden kontaminiert sein können. Demnach ergibt sich für alle Radionuklide und auf allen Lebensmittelpfaden, ausgenommen Trinkwasser und Muttermilch, ein Rückgang der Dosisbeiträge durch Ingestion. Die Aktualisierungen der Dosis- und Transferfaktoren wiederum sind nuklidspezifisch und können individuell zu einem Anstieg oder Rückgang des Dosisbeitrags führen. Darüber hinaus können die genannten Einflüsse einander auch kompensieren. Die gestiegene Bewässerungsrate, die aus dem erhöhten Wasserdefizit gemäß aktueller klimatischer Daten hervorgeht (siehe Kap. 3.1.1), führt zu einem leichten Anstieg der Einträge aller gelösten Nuklide in den Boden und damit auch der Dosisbeiträge zur externen Exposition bei Aufenthalt auf berechneten Böden, zur Inhalation sowie der Ingestionspfade über pflanzliche Lebensmittel, Blattgemüse, Milch und Milchprodukte sowie Fleisch und Fleischwaren.

Für die meisten Nuklide befinden sich die im Rahmen der ÜsiKo aktualisierten Dosiskonversionsfaktoren in derselben Größenordnung (Quotient zwischen 0,1 und 10) der alten Werte in /PRO 91/. Die Dosiskonversionsfaktoren sind außerdem in Tab. 3.3 angegeben. Um einen realistischen Vergleich zwischen damaligen und aktuellen Dosisberechnungen anstellen zu können, ist es geboten, die damals herangezogene Vergleichsgruppe der Kleinkinder der heutigen Altersgruppe von 1 – 2 a gegenüberzustellen. Zur Erläuterung der Wahl der Altersgruppen: Bei der damals maßgebenden Be-

⁴ In /PRO 91/ wurden zusätzlich Organdosen berechnet. Dies ist nach der aktuellen Berechnungsgrundlage /BASE 22/ nicht mehr vorgesehen.

rechnungsgrundlage waren die zu betrachtenden Referenzpersonen Kleinkind und Erwachsener. Seit der Novelle der StrlSchV von 2001 und der dazugehörigen Berechnungsgrundlage sind nunmehr 6 Altersgruppen zu betrachten. In /PRO 91/ wird Kleinkindern gemäß der damals maßgebenden AVV ein Lebensalter von 1 Jahr zugeordnet. Entsprechend der damals maßgebenden Berechnungsgrundlage wurde der Muttermilchpfad bei der Referenzperson Kleinkind nicht explizit berücksichtigt. Daher ist die zu der damaligen Referenzperson Kleinkind vergleichbare Altersgruppe diejenige von 1 – 2 Jahren. Der Muttermilchpfad muss nach aktueller Berechnungsgrundlage ausschließlich für die Altersgruppe der unter Einjährigen berücksichtigt werden. Für die damalige Referenzperson Erwachsener wird für einen Vergleich die Altersgruppe der über 17-jährigen zugeordnet.

Nach /BASE 22/ ist der vorgegebene Indikator zur Bewertung der Einhaltung von Schutzziele die über alle Radionuklide r und eine Lebenszeit von 70 Jahren gemittelte zusätzliche Jahresdosis \bar{E}_{Jahr} einer repräsentativen Person nach

$$\bar{E}_{\text{Jahr}} = \frac{1}{70} \cdot \sum_{j=1}^{70} \sum_r (E_{a,r,j} + E_{i,r,j}) \quad (35)$$

zu berechnen. Der Index j kennzeichnet die Lebensjahre, $E_{a,r,j}$ bezeichnet die effektive Dosis durch äußere und $E_{i,r,j}$ die effektive Dosis durch innere Exposition durch das Radionuklid r . Bei Berechnung der Dosiskonversionsfaktoren ist die Summation über alle Radionuklide nicht sinnvoll, da zur Ermittlung der effektiven Dosis die Beiträge der einzelnen Nuklide noch mit den jeweiligen spezifischen Aktivitäten zu multiplizieren sind. Zur Berechnung des Indikators wird die innere Summation gemäß Gleichung (35) nicht ausgeführt. Die Berechnung der äußeren Summe erfolgt, indem die jährliche Dosis jeder Altersklasse mit der Anzahl der in der Altersklasse verbrachten Lebensjahre multipliziert wird und die Beiträge der einzelnen Altersklassen addiert werden. Zur Bestimmung der über die Lebenszeit gemittelten zusätzlichen Jahresdosis ist die berechnete Lebenszeitdosis schließlich noch durch 70 Lebensjahre zu dividieren. Die Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung dieses Indikators sind in Tab. 3.5 angegeben.

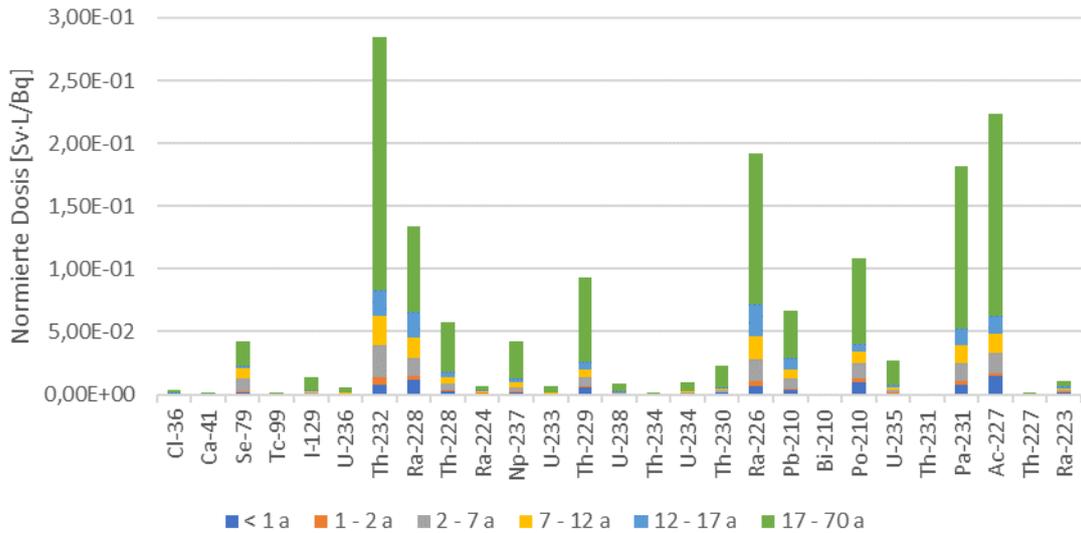


Abb. 3.5 Nuklidspezifische Aufschlüsselung der kumulierten, auf die Aktivitätskonzentration normierten Lebenszeitdosen

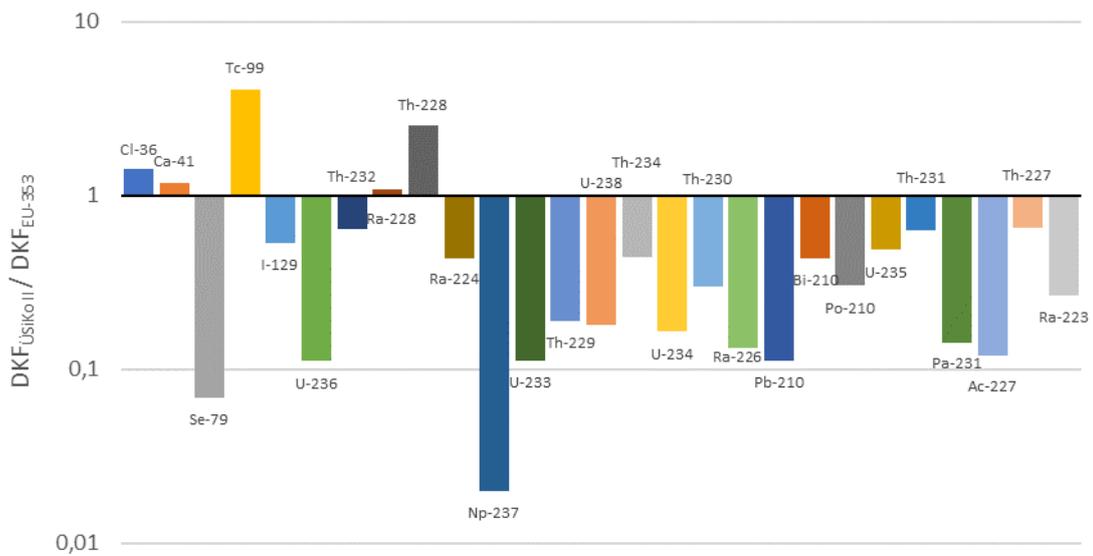


Abb. 3.6 Berechnete Dosiskonversionsfaktoren aller betrachteten Nuklide normiert auf die aus /PRO 91/ abgeleiteten Werte für die Altersgruppe > 17 bzw. Erwachsene

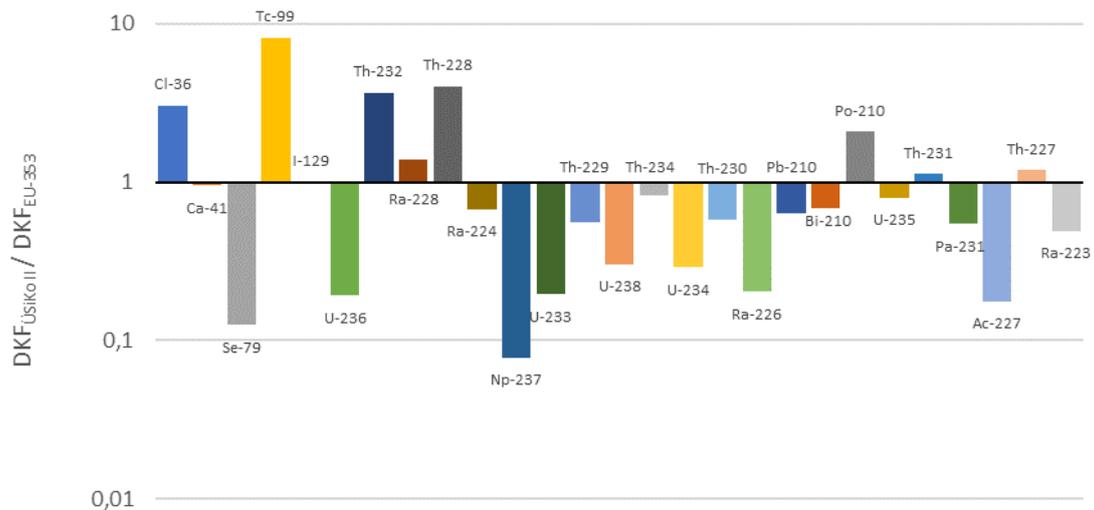


Abb. 3.7 Berechnete Dosiskonversionsfaktoren aller betrachteten Nuklide normiert auf die aus /PRO 91/ abgeleiteten Werte für die Altersgruppe 1 – 2 a bzw. Kleinkinder

Tab. 3.3 Berechnete Dosiskonversionsfaktoren [(Sv/a)/(Bq/l)] für Erwachsene im Vergleich mit den aus /PRO 91/ abgeleiteten Werten

Der Quotient wird durch Normierung der im Rahmen dieses Berichts ermittelten Dosiskonversionsfaktoren auf die Werte auf /PRO 91/ berechnet. Ein Rückgang der Dosiskonversionsfaktoren entspricht Quotienten < 1, ein Anstieg ist bei Quotienten > 1 zu verzeichnen.

Nuklid	ÜsiKo2	PRO 91	Quotient
Cl-36	3,70E-05	2,59E-05	1,43
Ca-41	3,71E-06	3,13E-06	1,19
Se-79	3,56E-04	5,19E-03	0,07
Tc-99	2,00E-05	4,87E-06	4,10
I-129	1,78E-04	3,33E-04	0,53
U-236	7,48E-05	6,67E-04	0,11
Th-232	3,80E-03	5,92E-03	0,64
Ra-228	1,28E-03	1,18E-03	1,09
Th-228	7,55E-04	3,00E-04	2,52
Ra-224	6,31E-05	1,45E-04	0,43
Np-237	5,67E-04	2,83E-02	0,02
U-233	8,08E-05	7,17E-04	0,11

Nuklid	ÜsiKo2	PRO 91	Quotient
Th-229	1,26E-03	6,67E-03	0,19
U-238	1,15E-04	6,40E-04	0,18
Th-234	3,70E-06	8,41E-06	0,44
U-234	1,19E-04	7,20E-04	0,17
Th-230	3,29E-04	1,10E-03	0,30
Ra-226	2,25E-03	1,69E-02	0,13
Pb-210	7,21E-04	6,47E-03	0,11
Bi-210	1,57E-06	3,59E-06	0,44
Po-210	1,28E-03	4,24E-03	0,30
U-235	3,63E-04	7,43E-04	0,49
Th-231	3,44E-07	5,42E-07	0,64
Pa-231	2,44E-03	1,72E-02	0,14
Ac-227	3,03E-03	2,53E-02	0,12
Th-227	1,41E-05	2,17E-05	0,65
Ra-223	9,31E-05	3,48E-04	0,27

Tab. 3.4 Berechnete Dosiskonversionsfaktoren [(Sv/a)/(Bq/l)] für Kleinkinder 1-2 a im Vergleich mit den aus /PRO 91/ abgeleiteten Werten

Der Quotient wird durch Normierung der im Rahmen dieses Berichts ermittelten Dosiskonversionsfaktoren auf die Werte auf /PRO 91/ berechnet. Ein Rückgang der Dosiskonversionsfaktoren entspricht Quotienten < 1, ein Anstieg ist bei Quotienten > 1 zu verzeichnen.

Nuklid	ÜsiKo2	PRO 91	Quotient
Cl-36	1,52E-04	5,00E-05	3,05
Ca-41	1,06E-05	1,11E-05	0,95
Se-79	1,81E-03	1,44E-02	0,12
Tc-99	3,85E-05	4,74E-06	8,12
I-129	2,64E-04	2,62E-04	1,01
U-236	1,09E-04	5,67E-04	0,19
Th-232	5,78E-03	1,58E-03	3,65

Nuklid	ÜsiKo2	PRO 91	Quotient
Ra-228	2,85E-03	2,05E-03	1,39
Th-228	1,21E-03	3,00E-04	4,02
Ra-224	2,09E-04	3,09E-04	0,68
Np-237	8,08E-04	1,04E-02	0,08
U-233	1,17E-04	6,00E-04	0,20
Th-229	1,41E-03	2,52E-03	0,56
U-238	1,70E-04	5,60E-04	0,30
Th-234	8,95E-06	1,08E-05	0,83
U-234	1,74E-04	6,00E-04	0,29
Th-230	2,55E-04	4,43E-04	0,57
Ra-226	3,80E-03	1,88E-02	0,20
Pb-210	1,75E-03	2,76E-03	0,63
Bi-210	3,53E-06	5,18E-06	0,68
Po-210	3,16E-03	1,52E-03	2,09
U-235	5,68E-04	7,14E-04	0,80
Th-231	8,54E-07	7,58E-07	1,13
Pa-231	2,75E-03	5,05E-03	0,54
Ac-227	2,23E-03	1,27E-02	0,18
Th-227	3,17E-05	2,67E-05	1,19
Ra-223	3,42E-04	6,96E-04	0,49

Tab. 3.5 Berechnete Dosiskonversionsfaktoren [(Sv/a)/(Bq/L)] für die Berechnung der über die Lebenszeit gemittelten potenziellen jährlichen Strahlenexposition einer repräsentativen Person von Geburt bis einschließlich des 70. Lebensjahres

Nuklid	Dosiskonversionsfaktor [(Sv/a)/(Bq/L)]
Cl-36	4,55E-05
Ca-41	5,33E-06
Se-79	5,98E-04
Tc-99	2,32E-05
I-129	1,93E-04
U-236	8,21E-05
Th-232	4,07E-03
Ra-228	1,91E-03
Th-228	8,28E-04
Ra-224	9,83E-05
Np-237	6,07E-04
U-233	8,92E-05
Th-229	1,33E-03
U-238	1,25E-04
Th-234	4,26E-06
U-234	1,33E-04
Th-230	3,35E-04
Ra-226	2,74E-03
Pb-210	9,57E-04
Bi-210	1,81E-06
Po-210	1,55E-03
U-235	3,92E-04
Th-231	4,61E-07
Pa-231	2,59E-03
Ac-227	3,20E-03
Th-227	1,73E-05
Ra-223	1,59E-04

4 Resümee und Zusammenfassung

In Phase 1 der ÜsiKo wurde folgender Aspekt zur Bearbeitung in der ÜsiKo Phase 2 identifiziert: „*Seit dem PFB für das Endlager Konrad wurden sowohl die Strahlenschutzverordnung, als auch die AVV zur Berechnung der Strahlenexposition überarbeitet [...]. Es wird empfohlen, die Dosisberechnung an die aktuelle Strahlenschutzverordnung [...] anzupassen.*“

Entsprechend der bestehenden Verordnungen /BMU 20/ – die nicht für Prognoserechnungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen anzuwenden ist – und /BASE 22/ – die lediglich auf Endlager für hochradioaktive Abfälle Anwendung findet – besteht zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts keine verbindliche Regelung bezüglich der im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse durchzuführenden Berechnung der Dosis durch aus einem Endlager für nicht-wärmeentwickelnde Abfälle potenziell freigesetzte Radionuklide. Die GRS hat sich dazu entschlossen, in Phase 2 der ÜsiKo die Berechnung der Dosis für die Langzeitsicherheitsanalyse Konrad in Anlehnung an die Vorgaben in der Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen /BASE 22/ durchzuführen, da diese Verordnung die einzige verfügbare spezifische Berechnungsgrundlage für die Endlagerung darstellt.

In der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad erfolgt die Dosisberechnung in der Biosphäre /PRO 91/ getrennt von der Modellierung des Transports in der Geosphäre /STO 86/. Für die Biosphärenmodellierung in diesem Bericht wird angegeben, welche jährliche Strahlenexposition in Sievert pro Jahr eine Person in der Bevölkerung als Folge einer normierten Kontamination des oberflächennahen Grundwassers mit Radionukliden einer Konzentration in Becquerel pro Liter erfährt. Der Umrechnungsfaktor wird als Dosiskonversionsfaktor bezeichnet.

Die Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen sieht verschiedene zu berücksichtigende Expositionspfade vor, auf denen die Ausbreitung von radioaktiven Stoffen in der Biosphäre zur Kontamination von Umweltmedien und Lebensmitteln und somit schließlich zur Strahlenexposition von Personen führen können. Grundsätzlich lässt sich zwischen Pfaden äußerer und innerer Strahlenexposition unterscheiden. Äußere Expositionspfade umfassen die von kontaminierten Böden und Ufersedimenten ausgehende Gammabodenstrahlung, während die Ingestion kontaminierter Lebensmittel und Bodenpartikel sowie die Inhalation resuspen-

dierter Staubpartikel die inneren Expositionspfade bilden. Die Dosisbeiträge der genannten Expositionspfade sind für sechs verschiedene Altersklassen einer repräsentativen Person entsprechend ihrer jeweiligen Lebensgewohnheiten zu ermitteln und zu einer Abschätzung einer über die Lebenszeit von 70 Jahren gemittelten, effektiven Jahresdosis heranzuziehen. Die Gesamtdosis berechnet sich durch Summation aller Beiträge durch externe Strahlung, Inhalation, Ingestion von Lebensmitteln und Muttermilch bzw. Milchfertigprodukten mit radionuklidspezifischer Gewichtung der dosisdominierenden Lebensmittelgruppe sowie der Ingestion von Boden.

In der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad /PRO 91/ wurden nur zwei Altersgruppen betrachtet. Der Vergleich zwischen den Dosiskonversionsfaktoren aus der hier durchgeführten Neuberechnung und den Werten in der Langzeitsicherheitsanalyse Konrad für diese beiden Altersgruppen führt für die meisten Radionuklide zu geringeren Werten der DKF. Die Abweichungen fallen klein aus und befinden sich meist innerhalb der gleichen Größenordnungen. Dies ist vor allem auf die angepassten Ernährungsgewohnheiten, einen erhöhten Bewässerungsbedarf, einen verringerten Anteil kontaminierter Lebensmittel aus lokaler Erzeugung sowie auf Aktualisierungen der Dosis- und Transferfaktoren zurückzuführen, wobei die genannten Einflüsse einander kompensieren können.

Mit den dargestellten Arbeiten in der Phase 2 der ÜsiKo ist das Delta 33 bearbeitet.

5 Literatur

- /BAZ 01/ Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition, BAnz Nr. 160a und b, Teil I, II, und III sowie IV und IV, 28.08.2001.
<https://www.base.bund.de/DE/base/gesetzeregelungen/dosiskoeffizienten/dosiskoeffizienten.html> (13.12.2022)
- /BFS 09/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Endlager Morsleben, Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS; Unterlagen-Nr. P 278, 2009.
- /BFS 90/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Plan Endlager für radioaktive Abfälle, Schachtanlage Konrad Salzgitter, Textband 1, September 1986 in der Fassung von April 1990. VDIS-KZL: 9K/-/DA/EB/0006/00
- /BGE 21/ Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH: Auflistung der sicherheitsrelevanten Deltas und der Hinweise aus Phase 1 der ÜSiKo. INFO KONRAD, Salzgitter, Juli 2021.
https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Konrad/Wesentliche_Unterlagen/UESiKo/Deltas_und_Hinweise_UesiKo_Phase_1.pdf (27.01.2022)
- /BMU 20/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten). 8. Juni 2020, BAnz AT 16.06.2020 B3.
- /BASE 22/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Bekanntmachung der „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen“ vom 30. Dezember 2022, BAnz AT 30.12.2022 B15.
- /DWD 23/ Deutscher Wetterdienst, CDC-OpenData Bereich, Klimadaten der Station 662 in Braunschweig Völkenrode, https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl-historical/, abgerufen am 28. April 2023.

- /IAEA 16/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Environmental Change in Post-closure Safety Assessment of Solid Radioactive Waste Repositories; IAEA-TECDOC-1799, Wien (Österreich), 2016.
- /IAEA 22/ Datenbank Nuclear Data Services der International Atomic Energy Agency (IAEA), <https://www-nds.iaea.org/> (14.12.2022)
- /NAG 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis); Technical Report 02-05; Wetingen (Schweiz), Dezember 2002.
- /PFB 02/ Niedersächsisches Umweltministerium; Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung; 1125 S., 22. Mai 2002. VDIS-KZL: 9K/1321/DA/ES/0001/00
- /PRO 91/ Pröhl, G.: Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift. EU 353 Rev. 1, Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung mbH, Institut für Strahlenschutz, München, 1991. VDIS-KZL: 9K/352127.32/EG/RB/0012/01
- /ROE 19/ Röhlig, K., Küppers, C., Schäfer, T., Walther, C.: Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo) Review der Phase 1 „Ermittlung des Überprüfungsbedarfs“; VDIS-KZL: 9KE/25232/B/RB/0012/00, 2019

- /RUE 19/ Rübel, A.; Behler, M.; Feinhals, J., Mönig, J., Poppei, J., Rätz, D., Wolf, J.: Projekt Konrad - Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo). Überprüfung der sicherheitsrelevanten Anforderungen zur Langzeitsicherheit, Kritikalität in der Nachbetriebsphase und thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins. Abschlussbericht zur Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Braunschweig: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, AF-Consult Switzerland Ltd., DMT GmbH & Co. KG, 2019. VDIS-KZL: 9KE/25232/B/RB/0009/00
- /RUE 25/ Rübel, A., Frank, T., Noseck, U., Wolf, J., Seher, H.: Projekt Konrad – Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo), Vorläufiger Abschlussbericht zur Phase 2: Radionuklidenausbreitung. Braunschweig: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-A-4078, 2025.
- /SSV 18/ Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4645) geändert worden ist
- /STO 86/ Storck, R., Butow, E., Heredia, L., Hossain, S., Kühle, T., Lütke-meier-Hosseini-pour, S., Nies, A., Pröhl, G., Struck, S.: Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklidenausbreitung in der Nachbetriebsphase. EU 076.1, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) mbH, München, 1986. VDIS-KZL: 9K/324.34/EG/RB/0004/00

A Ergebnisse nach Altersklassen

Im Folgenden ist eine Übersicht der über alle Expositionspfade summierten Dosiskonversionsfaktoren nach Altersklassen und Radionukliden dargestellt (Tab. A.1). Zudem erfolgt in den Tab. A.2 bis Tab. A.7 für jede Altersklasse eine Aufschlüsselung der prozentualen Beiträge durch die einzelnen Expositionspfade. Darin ist der dosisdominierende Lebensmittelpfad farblich hervorgehoben. Die Zahlenwerte beinhalten bereits die Gewichtung des dosisdominierenden Ingestionspfades.

Tab. A.1 Dosiskonversionsfaktoren für alle Altersgruppen summiert über alle Expositionspfade

Radionuklid	Dosiskonversionsfaktoren der Altersklasse [Sv·Bq ⁻¹ ·a ⁻¹ ·L]					
	≤ 1 a	1 - 2 a	2 - 7 a	7 - 12 a	12 - 17 a	> 17 a
Cl-36	8,53E-05	1,52E-04	8,82E-05	6,36E-05	4,62E-05	3,70E-05
Ca-41	7,64E-06	1,06E-05	8,53E-06	1,13E-05	1,19E-05	3,71E-06
Se-79	1,24E-03	1,81E-03	1,87E-03	1,62E-03	5,01E-04	3,56E-04
Tc-99	4,05E-05	3,85E-05	4,27E-05	3,07E-05	2,32E-05	2,00E-05
I-129	1,05E-04	2,64E-04	2,37E-04	2,80E-04	2,23E-04	1,78E-04
U-236	1,61E-04	1,09E-04	1,02E-04	9,78E-05	1,04E-04	7,48E-05
Th-232	7,67E-03	5,78E-03	5,13E-03	4,80E-03	4,08E-03	3,80E-03
Ra-228	1,22E-02	2,85E-03	2,73E-03	3,36E-03	4,02E-03	1,28E-03
Th-228	2,51E-03	1,21E-03	1,06E-03	9,66E-04	8,14E-04	7,55E-04
Ra-224	9,89E-04	2,09E-04	1,79E-04	1,62E-04	1,26E-04	6,31E-05
Np-237	1,54E-03	8,08E-04	7,21E-04	6,76E-04	6,11E-04	5,67E-04
U-233	1,74E-04	1,17E-04	1,11E-04	1,08E-04	1,15E-04	8,08E-05
Th-229	5,18E-03	1,41E-03	1,40E-03	1,36E-03	1,17E-03	1,26E-03
U-238	2,29E-04	1,70E-04	1,57E-04	1,51E-04	1,47E-04	1,15E-04
Th-234	1,53E-05	8,95E-06	7,27E-06	5,23E-06	3,14E-06	3,70E-06
U-234	2,99E-04	1,74E-04	1,71E-04	1,64E-04	1,71E-04	1,19E-04
Th-230	1,63E-03	2,55E-04	2,85E-04	2,82E-04	2,62E-04	3,29E-04
Ra-226	6,62E-03	3,80E-03	3,43E-03	3,81E-03	5,11E-03	2,25E-03
Pb-210	3,26E-03	1,75E-03	1,50E-03	1,56E-03	1,69E-03	7,21E-04
Bi-210	7,56E-06	3,53E-06	2,81E-06	2,20E-06	1,46E-06	1,57E-06
Po-210	9,72E-03	3,16E-03	2,52E-03	1,84E-03	1,17E-03	1,28E-03
U-235	6,48E-04	5,68E-04	5,04E-04	4,72E-04	4,21E-04	3,63E-04
Th-231	6,12E-06	8,54E-07	6,39E-07	4,89E-07	2,86E-07	3,44E-07
Pa-231	7,77E-03	2,75E-03	2,92E-03	2,81E-03	2,63E-03	2,44E-03
Ac-227	1,46E-02	2,23E-03	3,37E-03	3,02E-03	2,87E-03	3,03E-03
Th-227	1,19E-04	3,17E-05	2,59E-05	2,14E-05	1,58E-05	1,41E-05
Ra-223	1,93E-03	3,42E-04	2,87E-04	2,74E-04	2,28E-04	9,31E-05

Tab. A.2 Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse ≤ 1 a

Hervorhebung (fett) der Nuklide, für die eine Ernährung mit Muttermilch im Vergleich zu Milchersatzprodukten einen höheren Dosisbeitrag zur Folge hat. Die dosisdominierenden Lebensmittelpfade sind nuklidspezifisch farblich hervorgehoben.

Radionuklid	Σ [Sv·a ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·L]	Anteile äußere Exposition [%]			Anteile innere Exposition [%]								
		Böden	Ufers.	Inh.	Lebensmittel								
					Milch	Fleisch	Fisch	Trinkw.	Mutterm./ Milchfert.	Pflanzen	Blattg.	Boden	
Cl-36	8,53E-05	0,00	0,00	0,00	19,87	8,83	0,13	0,63	8,88	60,75	0,90	0,00	
Ca-41	7,64E-06	0,62	1,14	0,00	26,03	0,29	0,04	0,86	52,43	17,83	0,76	0,01	
Se-79	1,24E-03	0,00	0,00	0,00	5,37	2,98	4,97	0,18	54,93	30,30	1,27	0,00	
Tc-99	4,05E-05	0,00	0,00	0,00	0,04	18,25	0,49	1,36	50,54	28,12	1,20	0,00	
I-129	1,05E-04	2,19	13,72	0,00	12,68	1,97	1,29	9,43	43,91	14,04	0,75	0,01	
U-236	1,61E-04	0,40	0,74	2,15	1,53	0,14	0,05	11,99	55,81	25,78	1,28	0,13	
Th-232	7,67E-03	27,04	49,98	0,33	0,01	0,03	0,45	3,30	15,36	3,27	0,19	0,03	
Ra-228	1,22E-02	0,53	8,55	0,00	0,69	0,17	0,25	13,56	63,13	12,35	0,75	0,00	
Th-228	2,51E-03	1,01	44,81	0,01	0,01	0,02	1,11	8,11	37,77	6,73	0,42	0,00	
Ra-224	9,89E-04	0,02	0,73	0,00	0,74	0,19	0,27	15,01	69,85	12,41	0,78	0,00	
Np-237	1,54E-03	15,70	29,03	0,71	0,01	0,04	0,33	7,15	33,29	13,01	0,67	0,07	
U-233	1,74E-04	0,25	0,46	2,18	1,53	0,14	0,05	12,04	56,06	25,88	1,29	0,13	
Th-229	5,18E-03	6,47	12,27	1,13	0,02	0,11	1,59	11,68	54,39	11,54	0,68	0,12	
U-238	2,29E-04	11,54	21,33	1,41	1,04	0,09	0,04	8,15	37,93	17,52	0,87	0,09	
Th-234	1,53E-05	0,05	4,04	0,00	0,01	0,04	1,96	14,37	66,91	11,88	0,74	0,00	
U-234	2,99E-04	0,50	0,92	2,45	1,31	0,12	0,03	6,80	19,77	66,86	1,10	0,14	
Th-230	1,63E-03	1,20	2,22	1,43	0,03	0,13	1,89	13,86	64,53	13,75	0,81	0,15	
Ra-226	6,62E-03	24,55	17,39	0,05	0,39	0,10	0,07	3,91	11,37	41,46	0,68	0,04	
Pb-210	3,26E-03	0,01	0,13	0,01	0,44	0,17	1,61	14,17	65,97	16,54	0,93	0,02	
Bi-210	7,56E-06	0,00	0,00	0,00	0,68	3,02	0,74	10,92	74,96	9,11	0,57	0,00	
Po-210	9,72E-03	0,00	0,00	0,00	0,55	1,03	2,34	14,71	68,45	12,17	0,76	0,00	
U-235	6,48E-04	26,52	49,02	0,51	0,38	0,03	0,01	2,97	13,82	6,39	0,32	0,03	
Th-231	6,12E-06	0,00	0,31	0,00	0,00	0,01	0,48	3,51	92,61	2,90	0,18	0,00	
Pa-231	7,77E-03	6,22	11,57	0,63	0,01	1,08	1,26	9,21	42,85	25,77	1,23	0,19	
Ac-227	1,46E-02	0,26	4,67	0,12	0,03	10,64	1,70	12,46	57,99	11,42	0,69	0,01	
Th-227	1,19E-04	0,15	7,27	0,00	0,01	0,04	1,89	13,88	64,59	11,46	0,72	0,00	
Ra-223	1,93E-03	0,01	0,27	0,00	0,75	0,19	0,27	15,08	70,18	12,48	0,78	0,00	

Tab. A.3 Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 1 – 2 a

Radionuklid	Σ [Sv·a ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·L]	Anteile äußere Exposition [%]		Anteile innere Exposition [%]								
		Böden	Ufers.	Inh.	Lebensmittel						Blattg.	Boden
					Milch	Fleisch	Fisch	Trinkw.	Pflanzen			
Cl-36	1,52E-04	0,00	0,00	0,00	76,25	8,26	0,28	0,41	14,14	0,65	0,00	
Ca-41	1,06E-05	0,42	0,78	0,00	87,05	0,24	0,07	0,49	10,25	0,48	0,23	
Se-79	1,81E-03	0,00	0,00	0,00	8,93	3,63	13,96	0,16	72,07	1,18	0,07	
Tc-99	3,85E-05	0,00	0,00	0,00	0,07	23,92	1,50	1,25	72,06	1,20	0,01	
I-129	2,64E-04	0,82	5,14	0,00	65,81	2,50	3,75	8,34	12,52	0,73	0,39	
U-236	1,09E-04	0,56	1,03	4,75	2,96	0,19	0,18	11,90	71,51	1,40	5,53	
Th-232	5,78E-03	33,76	62,40	0,73	0,00	0,01	0,35	1,56	0,78	0,05	0,36	
Ra-228	2,85E-03	2,14	34,40	0,01	2,00	0,37	1,20	40,05	18,39	1,21	0,24	
Th-228	1,21E-03	1,97	87,69	0,04	0,00	0,01	1,38	6,14	2,57	0,17	0,02	
Ra-224	2,09E-04	0,08	3,25	0,00	3,06	0,56	1,89	63,07	26,28	1,79	0,00	
Np-237	8,08E-04	28,11	51,97	2,21	0,01	0,02	0,39	2,60	13,21	0,27	1,21	
U-233	1,17E-04	0,35	0,65	4,92	2,97	0,19	0,18	11,96	71,82	1,40	5,56	
Th-229	1,41E-03	22,41	42,50	6,79	0,03	0,09	3,20	14,22	7,08	0,46	3,22	
U-238	1,70E-04	14,64	27,06	2,82	1,75	0,11	0,11	7,05	42,36	0,83	3,28	
Th-234	8,95E-06	0,08	6,50	0,00	0,03	0,11	12,57	55,85	23,27	1,59	0,00	
U-234	1,74E-04	0,81	1,50	6,39	2,81	0,18	0,11	7,47	72,46	1,33	6,94	
Th-230	2,55E-04	7,22	13,36	15,08	0,07	0,21	7,25	32,20	16,10	1,04	7,48	
Ra-226	3,80E-03	40,20	28,47	0,13	0,50	0,09	0,15	2,52	26,43	0,48	1,04	
Pb-210	1,75E-03	0,01	0,24	0,02	1,24	0,35	7,73	20,63	67,29	1,49	0,99	
Bi-210	3,53E-06	0,00	0,00	0,00	3,34	10,86	6,18	54,93	23,11	1,57	0,00	
Po-210	3,16E-03	0,00	0,00	0,00	2,05	2,78	14,62	55,68	23,23	1,58	0,07	
U-235	5,68E-04	28,47	52,63	0,88	0,57	0,04	0,03	2,29	13,76	0,27	1,06	
Th-231	8,54E-07	0,03	2,09	0,00	0,04	0,12	13,17	58,53	24,38	1,66	0,00	
Pa-231	2,75E-03	16,47	30,65	3,19	0,01	0,79	2,13	4,72	36,97	0,70	4,37	
Ac-227	2,23E-03	1,60	28,73	1,26	0,07	33,92	6,25	13,89	12,85	0,85	0,59	
Th-227	3,17E-05	0,52	25,59	0,01	0,03	0,09	9,94	44,17	18,40	1,25	0,00	
Ra-223	3,42E-04	0,03	1,42	0,00	3,12	0,57	1,93	64,28	26,82	1,83	0,01	

Tab. A.4 Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 2 – 7 a

Radionuklid	Σ [Sv·a ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·L]	Anteile äußere Exposition [%]		Anteile innere Exposition [%]								
		Böden	Ufers.	Inh.	Lebensmittel						Blattg.	Boden
					Milch	Fleisch	Fisch	Trinkw.	Pflanzen			
Cl-36	8,82E-05	0,00	0,00	0,00	22,30	55,75	0,24	0,36	20,68	0,67	0,00	
Ca-41	8,53E-06	0,45	0,84	0,00	80,84	0,84	0,07	0,46	15,86	0,51	0,12	
Se-79	1,87E-03	0,00	0,00	0,00	5,85	9,14	9,14	0,10	74,83	0,91	0,03	
Tc-99	4,27E-05	0,00	0,00	0,00	0,03	79,47	0,65	0,54	18,71	0,61	0,00	
I-129	2,37E-04	0,80	5,01	0,00	56,63	8,26	3,23	7,18	17,96	0,73	0,20	
U-236	1,02E-04	0,52	0,96	5,71	2,05	0,51	0,12	8,24	78,50	1,13	2,25	
Th-232	5,13E-03	33,26	61,48	1,01	0,00	0,03	0,31	0,68	3,00	0,05	0,19	
Ra-228	2,73E-03	1,95	31,42	0,01	1,25	0,88	0,75	12,47	50,31	0,88	0,09	
Th-228	1,06E-03	1,96	87,18	0,04	0,00	0,03	0,93	2,08	7,63	0,14	0,01	
Ra-224	1,79E-04	0,09	3,29	0,00	1,89	1,33	1,17	19,50	71,43	1,29	0,00	
Np-237	7,21E-04	27,58	51,00	2,69	0,01	0,06	0,29	1,94	15,66	0,23	0,53	
U-233	1,11E-04	0,32	0,60	5,55	2,07	0,52	0,12	8,31	79,11	1,14	2,27	
Th-229	1,40E-03	19,73	37,42	8,13	0,02	0,28	2,51	5,58	24,43	0,42	1,49	
U-238	1,57E-04	13,85	25,61	3,29	1,26	0,32	0,08	5,08	48,42	0,70	1,39	
Th-234	7,27E-06	0,09	7,00	0,00	0,02	0,27	8,05	17,89	65,49	1,19	0,00	
U-234	1,71E-04	0,72	1,33	7,19	1,94	0,48	0,08	5,15	79,23	1,07	2,81	
Th-230	2,85E-04	5,65	10,45	15,90	0,04	0,55	4,90	10,89	47,83	0,82	2,97	
Ra-226	3,43E-03	38,95	27,58	0,16	0,36	0,25	0,11	1,80	29,95	0,40	0,43	
Pb-210	1,50E-03	0,01	0,24	0,02	0,88	0,97	5,51	14,70	76,00	1,24	0,41	
Bi-210	2,81E-06	0,00	0,00	0,00	2,08	51,93	3,84	17,07	23,94	1,14	0,00	
Po-210	2,52E-03	0,00	0,00	0,00	1,29	6,71	9,18	17,49	64,14	1,16	0,02	
U-235	5,04E-04	28,05	51,86	1,09	0,42	0,10	0,03	1,69	16,06	0,23	0,46	
Th-231	6,39E-07	0,03	2,44	0,00	0,02	0,28	8,45	18,78	68,74	1,24	0,00	
Pa-231	2,92E-03	13,48	25,09	4,18	0,01	2,42	1,69	3,76	46,68	0,65	2,04	
Ac-227	3,37E-03	0,93	16,65	0,88	0,03	61,34	2,94	6,53	10,07	0,46	0,16	
Th-227	2,59E-05	0,55	27,20	0,01	0,02	0,21	6,26	13,91	50,91	0,92	0,00	
Ra-223	2,87E-04	0,04	1,47	0,00	1,93	1,36	1,19	19,86	72,83	1,32	0,00	

Tab. A.5 Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 7 – 12 a

Radionuklid	Σ [Sv·a ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·L]	Anteil äußere Exposition [%]		Anteil innere Exposition [%]								
		Böden	Ufers.	Inh.	Lebensmittel						Blattg.	Boden
					Milch	Fleisch	Fisch	Trinkw.	Pflanzen			
Cl-36	6,36E-05	0,00	0,00	0,00	19,51	59,68	0,30	0,45	19,35	0,71	0,00	
Ca-41	1,13E-05	0,32	0,59	0,00	79,92	1,02	0,10	0,64	16,77	0,62	0,03	
Se-79	1,62E-03	0,00	0,00	0,00	5,28	10,10	11,66	0,13	71,83	0,99	0,01	
Tc-99	3,07E-05	0,00	0,00	0,00	0,03	81,24	0,76	0,63	16,72	0,61	0,00	
I-129	2,80E-04	0,63	3,94	0,00	18,98	10,16	4,59	10,19	50,58	0,89	0,05	
U-236	9,78E-05	0,50	0,93	6,42	1,89	0,58	0,16	10,74	77,00	1,26	0,51	
Th-232	4,80E-03	33,00	61,00	1,54	0,00	0,04	0,41	0,91	3,00	0,06	0,04	
Ra-228	3,36E-03	1,47	23,71	0,01	1,23	1,06	1,05	17,43	52,95	1,06	0,02	
Th-228	9,66E-04	1,99	88,64	0,06	0,00	0,03	0,98	2,17	6,01	0,12	0,00	
Ra-224	1,62E-04	0,09	3,37	0,00	1,66	1,43	1,45	24,12	66,51	1,37	0,00	
Np-237	6,76E-04	27,29	50,45	4,22	0,00	0,07	0,37	2,44	14,80	0,25	0,12	
U-233	1,08E-04	0,31	0,57	6,32	1,91	0,58	0,16	10,82	77,54	1,27	0,52	
Th-229	1,36E-03	18,84	35,73	11,87	0,02	0,29	3,08	6,85	22,56	0,44	0,32	
U-238	1,51E-04	13,42	24,80	3,78	1,19	0,36	0,10	6,76	48,47	0,79	0,32	
Th-234	5,23E-06	0,12	9,04	0,00	0,02	0,28	9,56	21,24	58,54	1,21	0,00	
U-234	1,64E-04	0,70	1,29	8,36	1,81	0,55	0,10	6,78	78,55	1,21	0,65	
Th-230	2,82E-04	5,29	9,79	22,21	0,04	0,56	5,74	12,76	42,19	0,82	0,61	
Ra-226	3,81E-03	32,58	23,07	0,16	0,44	0,38	0,19	3,15	39,31	0,60	0,13	
Pb-210	1,56E-03	0,01	0,21	0,03	0,78	1,05	6,87	18,32	71,31	1,33	0,09	
Bi-210	2,20E-06	0,00	0,00	0,00	1,70	52,03	4,44	19,74	20,97	1,13	0,00	
Po-210	1,84E-03	0,00	0,00	0,00	1,10	7,03	11,11	21,15	58,39	1,20	0,01	
U-235	4,72E-04	27,83	51,45	1,33	0,40	0,12	0,03	2,26	16,20	0,27	0,11	
Th-231	4,89E-07	0,04	2,96	0,00	0,02	0,30	10,21	22,68	62,50	1,29	0,00	
Pa-231	2,81E-03	12,96	24,12	6,05	0,01	2,73	2,21	4,91	45,83	0,72	0,47	
Ac-227	3,02E-03	0,96	17,23	1,24	0,03	60,58	3,35	7,44	8,69	0,45	0,03	
Th-227	2,14E-05	0,62	30,41	0,02	0,01	0,21	7,26	16,12	44,44	0,92	0,00	
Ra-223	2,74E-04	0,03	1,42	0,00	1,69	1,46	1,48	24,60	67,91	1,40	0,00	

Tab. A.6 Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse 12 – 17 a

Radionuklid	Σ [Sv·a ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·L]	Anteile äußere Exposition [%]		Anteile innere Exposition [%]								
		Böden	Ufers.	Inh.	Lebensmittel						Blattg.	Boden
					Milch	Fleisch	Fisch	Trinkw.	Pflanzen			
Cl-36	4,62E-05	0,00	0,00	0,00	16,98	63,94	0,29	0,52	17,52	0,75	0,00	
Ca-41	1,19E-05	0,26	0,48	0,00	79,07	1,24	0,11	0,84	17,25	0,74	0,01	
Se-79	5,01E-04	0,00	0,00	0,00	5,01	11,78	12,28	0,16	69,62	1,15	0,00	
Tc-99	2,32E-05	0,00	0,00	0,00	0,02	83,43	0,71	0,71	14,51	0,63	0,00	
I-129	2,23E-04	0,67	4,18	0,00	17,53	11,55	4,71	12,55	47,80	1,00	0,02	
U-236	1,04E-04	0,40	0,74	6,76	1,78	0,67	0,17	13,50	74,29	1,45	0,23	
Th-232	4,08E-03	32,85	60,72	2,17	0,00	0,05	0,46	2,45	1,21	0,07	0,02	
Ra-228	4,02E-03	1,04	16,74	0,01	1,40	1,48	1,32	52,71	23,83	1,47	0,01	
Th-228	8,14E-04	2,03	90,36	0,07	0,00	0,03	0,87	4,62	1,90	0,12	0,00	
Ra-224	1,26E-04	0,10	3,94	0,00	1,63	1,73	1,58	63,35	26,00	1,65	0,00	
Np-237	6,11E-04	25,62	47,37	5,68	0,01	0,09	0,45	3,60	16,77	0,34	0,06	
U-233	1,15E-04	0,25	0,45	7,04	1,79	0,67	0,17	13,53	74,42	1,46	0,23	
Th-229	1,17E-03	18,59	35,26	14,74	0,02	0,36	3,39	18,10	8,87	0,53	0,15	
U-238	1,47E-04	11,69	21,60	4,38	1,21	0,45	0,11	9,14	50,28	0,98	0,15	
Th-234	3,14E-06	0,16	12,72	0,00	0,02	0,32	10,02	53,44	21,92	1,39	0,00	
U-234	1,71E-04	0,57	1,05	8,63	1,73	0,65	0,11	8,66	76,91	1,41	0,29	
Th-230	2,62E-04	4,83	8,93	27,86	0,04	0,68	6,30	33,57	16,53	0,99	0,28	
Ra-226	5,11E-03	20,56	14,56	0,13	0,61	0,65	0,29	5,87	56,23	1,02	0,09	
Pb-210	1,69E-03	0,01	0,17	0,03	0,72	1,18	7,01	22,42	66,95	1,49	0,04	
Bi-210	1,46E-06	0,00	0,00	0,00	1,42	53,29	4,11	21,90	18,15	1,15	0,00	
Po-210	1,17E-03	0,00	0,00	0,00	1,07	8,39	11,96	54,68	22,47	1,43	0,00	
U-235	4,21E-04	26,57	49,11	1,61	0,44	0,17	0,04	3,33	18,31	0,36	0,06	
Th-231	2,86E-07	0,06	4,29	0,00	0,02	0,36	11,00	58,68	24,07	1,53	0,00	
Pa-231	2,63E-03	12,39	23,07	8,38	0,01	3,13	2,28	6,09	43,63	0,82	0,20	
Ac-227	2,87E-03	0,85	15,37	1,32	0,02	62,84	3,14	8,37	7,62	0,47	0,01	
Th-227	1,58E-05	0,76	37,24	0,03	0,01	0,23	7,13	38,02	15,60	0,99	0,00	
Ra-223	2,28E-04	0,04	1,51	0,00	1,68	1,77	1,62	64,98	26,70	1,69	0,00	

Tab. A.7 Dosiskonversionsfaktoren aller Expositionspfade der Altersklasse > 17 a

Radionuklid	Σ [Sv·a ⁻¹ ·Bq ⁻¹ ·L]	Anteile äußere Exposition [%]		Anteile innere Exposition [%]								
		Böden	Ufers.	Inh.	Lebensmittel						Blattg.	Boden
					Milch	Fleisch	Fisch	Trinkw.	Pflanzen			
Cl-36	3,70E-05	0,00	0,00	0,00	12,57	69,62	0,42	0,88	15,65	0,86	0,00	
Ca-41	3,71E-06	0,75	1,39	0,00	73,68	1,70	0,19	1,79	19,41	1,07	0,02	
Se-79	3,56E-04	0,00	0,00	0,00	3,81	13,18	18,32	0,28	63,06	1,35	0,00	
Tc-99	2,00E-05	0,00	0,00	0,00	0,02	85,09	0,96	1,12	12,14	0,67	0,00	
I-129	1,78E-04	0,76	4,77	0,00	13,23	12,82	6,97	43,36	16,90	1,17	0,02	
U-236	7,48E-05	0,51	0,94	9,53	1,27	0,70	0,24	22,01	62,99	1,60	0,21	
Th-232	3,80E-03	32,10	59,34	2,37	0,00	0,06	0,68	4,24	1,10	0,08	0,02	
Ra-228	1,28E-03	2,96	47,73	0,03	0,44	0,68	0,81	37,66	8,98	0,71	0,00	
Th-228	7,55E-04	1,99	88,60	0,07	0,00	0,03	1,07	6,68	1,45	0,12	0,00	
Ra-224	6,31E-05	0,19	7,18	0,00	0,81	1,27	1,55	72,13	15,62	1,27	0,00	
Np-237	5,67E-04	25,06	46,34	7,22	0,00	0,11	0,73	13,57	6,47	0,43	0,06	
U-233	8,08E-05	0,32	0,59	9,73	1,28	0,71	0,24	22,10	63,23	1,61	0,21	
Th-229	1,26E-03	15,65	29,69	15,15	0,01	0,35	4,36	27,12	7,01	0,54	0,13	
U-238	1,15E-04	13,59	25,12	5,72	0,79	0,44	0,15	13,74	39,33	1,00	0,13	
Th-234	3,70E-06	0,13	9,83	0,00	0,01	0,25	10,35	64,38	13,93	1,13	0,00	
U-234	1,19E-04	0,74	1,37	12,93	1,26	0,70	0,15	14,41	66,59	1,59	0,27	
Th-230	3,29E-04	3,50	6,47	24,87	0,02	0,58	7,18	44,68	11,60	0,89	0,21	
Ra-226	2,25E-03	42,40	30,02	0,30	0,20	0,31	0,19	4,35	21,68	0,51	0,04	
Pb-210	7,21E-04	0,02	0,36	0,07	0,47	1,13	8,97	66,98	20,47	1,50	0,03	
Bi-210	1,57E-06	0,00	0,00	0,00	0,82	22,71	4,67	58,08	12,69	1,03	0,00	
Po-210	1,28E-03	0,00	0,00	0,00	0,56	6,45	12,26	65,40	14,17	1,15	0,00	
U-235	3,63E-04	27,99	51,75	1,92	0,26	0,14	0,05	4,53	12,98	0,33	0,04	
Th-231	3,44E-07	0,04	3,24	0,00	0,01	0,27	11,11	69,15	14,96	1,22	0,00	
Pa-231	2,44E-03	12,14	22,59	9,34	0,00	3,37	3,28	10,19	37,97	0,93	0,19	
Ac-227	3,03E-03	0,73	13,22	1,36	0,01	61,31	4,08	12,70	6,10	0,48	0,01	
Th-227	1,41E-05	0,77	37,97	0,03	0,01	0,17	7,04	43,78	9,47	0,77	0,00	
Ra-223	9,31E-05	0,08	3,37	0,00	0,85	1,32	1,61	75,16	16,29	1,32	0,00	

B Physikalische und dosimetrische Eingangsdaten

Tab. B.1: Zur Berechnung verwendete physikalische Parameter der betrachteten Radionuklide

Physikalische Zerfallskonstanten λ in s^{-1} , dimensionslose Anteil am Zerfall des Mutternuklids $a_{ri-1,ri}$ (betrifft nur Nuklide aus Zerfallsreihen) und dimensionslose Anteile f_r des Gamma-Emissionsspektrums oberhalb einer Energie von 0,2 MeV, entnommen aus der Datenbank Nuclear Data Services /IAEA 22/ der International Atomic Energy Agency.

Radionuklid	λ [s^{-1}]	$a_{ri-1,ri}$	f_r
Cl-36	7,28E-14	--	0,98
Ca-41	2,21E-13	--	0,00
Se-79	6,70E-14	--	--
Tc-99	1,04E-13	--	--
I-129	1,39E-15	--	0,00
U-236	9,38E-16	--	0,00
Th-232	1,57E-18	1,00	0,00
Ra-228	3,82E-09	1,00	0,00
Th-228	1,15E-08	1,00	0,20
Ra-224	2,21E-06	1,00	0,96
Np-237	1,02E-14	--	0,02
U-233	1,38E-13	1,00	0,09
Th-229	2,78E-12	1,00	0,08
U-238	4,92E-18	--	0,00
Th-234	3,33E-07	1,00	0,00
U-234	8,95E-14	1,00	0,00
Th-230	2,91E-13	1,00	0,02
Ra-226	1,37E-11	1,00	0,00
Pb-210	9,89E-10	1,00	0,00
Bi-210	1,60E-06	1,00	--
Po-210	5,80E-08	1,00	1,00
U-235	3,12E-17	--	0,08
Th-231	7,54E-06	1,00	0,00
Pa-231	6,70E-13	1,00	0,69
Ac-227	1,01E-09	1,00	0,01
Th-227	4,29E-07	0,986	0,82
Ra-223	7,02E-07	1,00	0,53

Tab. B.2: Zur Berechnung verwendete Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten für Bodenstrahlung und Inhalation

Dosisleistungskoeffizienten für Bodenstrahlung $g_{b,r,eff}$ in $Sv Bq^{-1}$ inkl. Beitrag durch Tochternuklide (wo angegeben) und Dosiskoeffizienten für Inhalation $g_{h,r,eff}$ in $Sv Bq^{-1}$ nach Altersklassen gemäß /BAZ 01/.

Radionuklid	$g_{b,r,eff}$ [$Sv s Bq^{-1} m^{-2}$]	$g_{h,r,eff}$ [$Sv Bq^{-1}$]					
		< 1 a	1 - 2 a	2- 7 a	7 - 12 a	12 - 17 a	> 17 a
Cl-36	0,00E+00	3,10E-08	2,60E-08	1,50E-08	1,00E-08	8,80E-09	7,30E-09
Ca-41	4,10E-20	6,70E-10	6,00E-10	3,80E-10	3,30E-10	3,30E-10	1,80E-10
Se-79	0,00E+00	2,30E-08	2,00E-08	1,30E-08	8,70E-09	7,60E-09	6,80E-09
Tc-99	0,00E+00	4,10E-08	3,70E-08	2,40E-08	1,70E-08	1,50E-08	1,30E-08
I-129	2,00E-17	7,20E-08	8,60E-08	6,10E-08	6,70E-08	4,60E-08	3,60E-08
U-236	5,60E-19	3,10E-05	2,70E-05	1,80E-05	1,10E-05	9,50E-06	8,70E-06
Th-232	1,80E-15	2,30E-04	2,20E-04	1,60E-04	1,30E-04	1,20E-04	1,10E-04
Ra-228	2,20E-15	4,90E-05	4,80E-05	3,20E-05	2,00E-05	1,60E-05	1,60E-05
Th-228	1,30E-15	1,80E-04	1,50E-04	8,30E-05	5,50E-05	4,70E-05	4,00E-05
Ra-224	1,30E-15	1,20E-05	9,20E-06	5,90E-06	4,40E-06	4,20E-06	3,40E-06
Np-237	2,10E-16	9,80E-05	9,30E-05	6,00E-05	5,00E-05	4,70E-05	5,00E-05
U-233	3,80E-19	3,40E-05	3,00E-05	1,90E-05	1,20E-05	1,10E-05	9,60E-06
Th-229	3,00E-16	5,40E-04	5,10E-04	3,60E-04	2,90E-04	2,40E-04	2,40E-04
U-238	2,30E-17	2,90E-05	2,50E-05	1,60E-05	1,00E-05	8,70E-06	8,00E-06
Th-234	2,30E-17	4,10E-08	3,10E-08	1,70E-08	1,10E-08	9,10E-09	7,70E-09
U-234	6,50E-19	3,30E-05	2,90E-05	1,90E-05	1,20E-05	1,00E-05	9,40E-06
Th-230	1,70E-17	2,10E-04	2,00E-04	1,40E-04	1,10E-04	9,90E-05	1,00E-04
Ra-226	1,60E-15	3,40E-05	2,90E-05	1,90E-05	1,20E-05	1,00E-05	9,50E-06
Pb-210	2,30E-18	1,80E-05	1,80E-05	1,10E-05	7,20E-06	5,90E-06	5,60E-06
Bi-210	0,00E+00	3,90E-07	3,00E-07	1,90E-07	1,30E-07	1,10E-07	9,30E-08
Po-210	0,00E+00	1,80E-05	1,40E-05	8,60E-06	5,90E-06	5,10E-06	4,30E-06
U-235	1,50E-16	3,00E-05	2,60E-05	1,70E-05	1,10E-05	9,20E-06	8,50E-06
Th-231	1,60E-17	2,40E-09	1,70E-09	8,00E-10	5,20E-10	4,10E-10	3,30E-10
Pa-231	2,20E-16	2,20E-04	2,30E-04	1,90E-04	1,50E-04	1,50E-04	1,40E-04
Ac-227	3,60E-16	1,70E-03	1,60E-03	1,00E-03	7,20E-04	5,60E-04	5,50E-04
Th-227	3,60E-16	3,90E-05	3,00E-05	1,90E-05	1,40E-05	1,30E-05	1,00E-05
Ra-223	2,70E-16	3,20E-05	2,40E-05	1,50E-05	1,10E-05	1,10E-05	8,70E-06

Tab. B.3: Zur Berechnung verwendete Dosiskoeffizienten für Ingestion von Lebensmitteln und Muttermilch

Dosiskoeffizienten für Ingestion von Lebensmitteln $g_{g,r,eff}$ in $Sv Bq^{-1}$ nach Altersklassen gemäß /BAZ 01/ und Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion der Radionuklide durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM}$ in $Sv Bq^{-1}$ sowie bei Inhalation der Radionuklide durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM}$ in $Sv Bq^{-1}$ /BAZ 01/.

Radionuklid	$g_{g,r,eff}$ [$Sv Bq^{-1}$]						$g_{g,r,eff}^{MM}$ [$Sv Bq^{-1}$]	$g_{h,r,eff}^{MM}$ [$Sv Bq^{-1}$]
	< 1 a	1 - 2 a	2- 7 a	7 - 12 a	12 - 17 a	> 17 a		
Cl-36	9,80E-09	6,30E-09	3,20E-09	1,90E-09	1,20E-09	9,30E-10	5,60E-09	2,20E-09
Ca-41	1,20E-09	5,20E-10	3,90E-10	4,80E-10	5,00E-10	1,90E-10		
Se-79	4,10E-08	2,80E-08	1,90E-08	1,40E-08	4,10E-09	2,90E-09		
Tc-99	1,00E-08	4,80E-09	2,30E-09	1,30E-09	8,20E-10	6,40E-10		
I-129	1,80E-07	2,20E-07	1,70E-07	1,90E-07	1,40E-07	1,10E-07		
U-236	3,50E-07	1,30E-07	8,40E-08	7,00E-08	7,00E-08	4,70E-08	1,80E-10	2,20E-09
Th-232	4,60E-06	4,50E-07	3,50E-07	2,90E-07	2,50E-07	2,30E-07	8,60E-11	3,90E-08
Ra-228	3,00E-05	5,70E-06	3,40E-06	3,90E-06	5,30E-06	6,90E-07	9,70E-08	1,20E-07
Th-228	3,70E-06	3,70E-07	2,20E-07	1,40E-07	9,40E-08	7,20E-08	7,90E-10	2,70E-07
Ra-224	2,70E-06	6,60E-07	3,50E-07	2,60E-07	2,00E-07	6,50E-08	6,00E-09	8,00E-09
Np-237	2,00E-06	2,10E-07	1,40E-07	1,10E-07	1,10E-07	1,10E-07	4,50E-11	2,20E-08
U-233	3,80E-07	1,40E-07	9,20E-08	7,80E-08	7,80E-08	5,10E-08	1,90E-10	2,30E-09
Th-229	1,10E-05	1,00E-06	7,80E-07	6,20E-07	5,30E-07	4,90E-07		
U-238	3,40E-07	1,20E-07	8,00E-08	6,80E-08	6,70E-08	4,50E-08	1,70E-10	2,10E-09
Th-234	4,00E-08	2,50E-08	1,30E-08	7,40E-09	4,20E-09	3,40E-09	4,60E-13	2,20E-10
U-234	3,70E-07	1,30E-07	8,80E-08	7,40E-08	7,40E-08	4,90E-08	1,90E-10	2,30E-09
Th-230	4,10E-06	4,10E-07	3,10E-07	2,40E-07	2,20E-07	2,10E-07	5,30E-11	2,60E-08
Ra-226	4,70E-06	9,60E-07	6,20E-07	8,00E-07	1,50E-06	2,80E-07	1,50E-08	1,90E-08
Pb-210	8,40E-06	3,60E-06	2,20E-06	1,90E-06	1,90E-06	6,90E-07	1,50E-07	2,00E-07
Bi-210	1,50E-08	9,70E-09	4,80E-09	2,90E-09	1,60E-09	1,30E-09		
Po-210	2,60E-05	8,80E-06	4,40E-06	2,60E-06	1,60E-06	1,20E-06	2,80E-07	8,80E-08
U-235	3,50E-07	1,30E-07	8,50E-08	7,10E-08	7,00E-08	4,70E-08	1,80E-10	2,20E-09
Th-231	3,90E-09	2,50E-09	1,20E-09	7,40E-10	4,20E-10	3,40E-10		
Pa-231	1,30E-05	1,30E-06	1,10E-06	9,20E-07	8,00E-07	7,10E-07		
Ac-227	3,30E-05	3,10E-06	2,20E-06	1,50E-06	1,20E-06	1,10E-06		
Th-227	3,00E-07	7,00E-08	3,60E-08	2,30E-08	1,50E-08	8,80E-09		
Ra-223	5,30E-06	1,10E-06	5,70E-07	4,50E-07	3,70E-07	1,00E-07		

Tab. B.4: Zur Berechnung verwendete Parameter bei Anlagerungsprozessen an Schwebstoffe in Oberflächengewässern

Elementspezifische Konzentrationsfaktoren für Anlagerung an Schwebstoffe $K_{Se,r}$ in $L \cdot kg^{-1}$, elementspezifische Anlagerungshalbwertszeiten $T_{Anl,r}$ in d und Anlagerungskonstanten $\lambda_{Anl,r}$ in s^{-1} . Nicht explizit in /BASE 22/ aufgeführte Elemente wurden der Elementgruppe 3 mit den höchsten Anlagerungshalbwertszeiten zugeordnet.

Radionuklid	$K_{Se,r}$ [l/kg]	$T_{Anl,r}$ [d]	$\lambda_{Anl,r}$ [1/s]
Cl-36	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Ca-41	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Se-79	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Tc-99	2,00E+02	0	0,00E+00
I-129	5,00E+03	1,5	5,00E-06
U-236	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Th-232	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Ra-228	5,00E+03	1,5	5,00E-06
Th-228	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Ra-224	5,00E+03	1,5	5,00E-06
Np-237	1,80E+04	2,5	3,00E-06
U-233	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Th-229	1,80E+04	2,5	3,00E-06
U-238	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Th-234	1,80E+04	2,5	3,00E-06
U-234	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Th-230	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Ra-226	5,00E+03	1,5	5,00E-06
Pb-210	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Bi-210	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Po-210	1,80E+04	2,5	3,00E-06
U-235	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Th-231	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Pa-231	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Ac-227	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Th-227	1,80E+04	2,5	3,00E-06
Ra-223	5,00E+03	1,5	5,00E-06

Tab. B.5: Zur Berechnung verwendete Transfer- und Konzentrationsfaktoren

Radionuklid	Konzentrations-/Transferfaktoren					
	Milch	Fleisch	Weideboden	Pflanzen & Blatt- gemüse	Muttermilch bei Ingestion	Muttermilch bei Inhalation
	T_{r}^{Mi} [d/l]	T_{r}^{Fl} [d/kg]	T_{r}^{Wd} [Bq/kg]	T_{r}^{PlBl} [Bq/kg]	$T^{MM,g}$ [d/l]	$T^{MM,h}$ [d/l]
Cl-36	2,00E-02	8,00E-02	1,00E+01	1,00E+01	0,08	3,00E-02
Ca-41	1,00E-02	1,00E-03	2,00E-01	6,00E-02	4,00E-01	3,00E-01
Se-79	4,00E-03	2,00E-02	5,00E-01	5,00E-01	3,00E-01	1,00E-01
Tc-99	1,00E-05	4,00E-02	2,00E+01	6,00E+00	6,00E-01	4,00E-01
I-129	5,00E-03	7,00E-03	1,00E-01	2,00E-02	6,00E-01	6,00E-01
U-236	5,00E-04	4,00E-04	9,00E-03	4,00E-03	2,00E-02	2,00E-01
Th-232	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
Ra-228	4,00E-04	9,00E-04	1,00E-02	1,00E-02	2,00E-01	3,00E-01
Th-228	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
Ra-224	4,00E-04	9,00E-04	1,00E-02	1,00E-02	2,00E-01	3,00E-01
Np-237	5,00E-06	2,00E-04	1,00E-02	3,00E-03	6,00E-04	3,00E-01
U-233	5,00E-04	4,00E-04	9,00E-03	4,00E-03	2,00E-02	2,00E-01
Th-229	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
U-238	5,00E-04	4,00E-04	9,00E-03	4,00E-03	2,00E-02	2,00E-01
Th-234	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
U-234	5,00E-04	4,00E-04	9,00E-03	4,00E-03	2,00E-02	2,00E-01
Th-230	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
Ra-226	4,00E-04	9,00E-04	1,00E-02	1,00E-02	2,00E-01	3,00E-01
Pb-210	2,00E-04	7,00E-04	2,00E-02	1,00E-02	2,00E-01	3,00E-01
Bi-210	5,00E-04	2,00E-02	2,00E-01	2,00E-01	6,00E-02	3,00E-01
Po-210	3,00E-04	5,00E-03	2,00E-02	8,00E-04	6,00E-01	3,00E-01
U-235	5,00E-04	4,00E-04	9,00E-03	4,00E-03	2,00E-02	2,00E-01
Th-231	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
Pa-231	5,00E-06	5,00E-03	3,00E-03	3,00E-03	6,00E-04	1,00E-01
Ac-227	2,00E-05	6,00E-02	3,00E-03	3,00E-03	6,00E-04	3,00E-01
Th-227	5,00E-06	2,00E-04	2,00E-02	5,00E-04	2,00E-02	3,00E-01
Ra-223	4,00E-04	9,00E-04	1,00E-02	1,00E-02	2,00E-01	3,00E-01

Tab. B.6: Parameter zu Aufenthaltsdauern und Reduktionsfaktoren

Expositionsprofil	Aufenthaltsdauer	Wert [h/a]	Wert [s/a]	Reduktionsfaktor $f_{Ge,b}$
Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe	im Freien t_{Fr}	1760	6,3E+06	1
	im Freien t_{Fr}	1000	3,6E+06	1
	in Gebäuden t_{Ge}	7000	2,5E+07	0,3
Inhalation radioaktiver Stoffe	im Freien t_{Fr}	1760	6,3E+06	1
	in Gebäuden t_{Ge}	7000	2,5E+07	1
Aufenthalt auf Sediment	Ufersediment t_{Fr}	760	2,7E+06	1

Tab. B.7: Dimensionslose Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie nach Altersklassen

Altersklasse	≤ 1 a	> 1 – ≤ 2 a	> 2 – ≤ 7 a	> 7 – ≤ 12 a	> 12 – ≤ 17 a	> 17 a
$C_{Geo,b1}$	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1
$C_{Geo,b2}$	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1	1

Tab. B.8: Verzehrsgewohnheiten nach Altersklassen

Altersgruppe	≤ 1 a	1 – 2 a	2 – 7 a	7 – 12 a	12 – 17 a	> 17 a	Multiplikator für dosisdom. Gruppe
Lebensmittel							
U^{TW} [l/a]	55	100	100	150	200	350	2
U^{MM} [kg/a]	200						1,6
U^{Mi} [kg/a]	45	160	160	170	170	130	3
U^{Fi} [kg/a]	0,5	3	3	4,5	5	7,5	5
U^{Fl} [kg/a]	5	13	50	65	80	90	2
U^{Pf} (Getreide, Getreideprodukte) [kg/a]	12	30	80	95	110	110	2
U^{Pf} (Einheimisches Frischobst, Obstprodukte, Säfte) [kg/a]	25	45	65	65	60	35	3
U^{Pf} (Kartoffeln, Wurzelgemüse, Säfte) [kg/a]	30	40	45	55	55	55	3
U^{Pf} (Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte) [kg/a]	5	17	30	35	35	40	3
U^{Bl} Blattgemüse [kg/a]	3	6	7	9	11	13	3

Tab. B.9: Bodeningestion nach Altersklassen

Altersgruppe	≤ 1 a	1 – 2 a	2 – 7 a	7 – 12 a	12 – 17 a	> 17 a
Bodeningestion [kg/a]	5,70E-04	4,60E-02	2,70E-02	7,10E-03	3,30E-03	3,30E-03

Tab. B.10: Sonstige zur Berechnung verwendete Parameter

Parameter	Wert	Erklärung
$AF_{20\mu m,r}$	4	Aufkonzentrierungsfaktor bez. Staubfraktion < 20 μm
$AF_{500\mu m,r}$	2	Aufkonzentrierungsfaktor bez. Staubfraktion < 500 μm
$C_{k,r}^{Wq/l}$	1	Einheitsaktivitätskonzentration im Grundwasser
f_n	1	Konsumierter Anteil kontaminierten Trinkwassers und Muttermilch
	0,5	Konsumierter Anteil kontaminierter übriger Lebensmittel
f_w	0,3	Anteil der durch Beregnung auf der Pflanze abgelagerten Aktivität
L [l/d]	100	Täglicher Wasserkonsum eines Rinds
M_{Fu} [kg/d]	70	Tägliche Aufnahme von Futter (Weidebewuchs) von Vieh
p^{Wd} [kg/m ²]	120	Flächentrockenmasse von Weideboden
S_{St} [kg/m ³]	5,00E-08	Staubkonzentration in der bodennahen Luft
t_{1a} [s]	31.557.600	Dauer eines Jahres in Sekunden
t_{eff} [s]	1,58E-09	Zeitspanne, während der Sediment der Dicke $U_r = 0,05$ m abgelagert wird
t_r [d]	5	Zeit zw. Eintritt d. Radionuklids r in d. Oberflächengewässer und Entnahme d. Wassers
t_r [s]	432.000	Zeit zw. Eintritt d. Radionuklids r in d. Oberflächengewässer und Entnahme d. Wassers
$t^{Pn,Bl,W}$ [s]	5,20E+06	Zeitdauer, während der Pflanzen und Blattgemüse während der Wachstumsperiode infolge Beregnung oberirdisch kontaminiert werden
t^{Wd}_w [s]	2,60E+06	Zeitdauer, während der Weidepflanzen während der Wachstumsperiode infolge Beregnung oberirdisch kontaminiert werden
v_{se} [m/s]	2,10E-10	Sedimentationsgeschwindigkeit
W_k [l/m ² s]	3,523E-06	Bewässerungsrate gemäß Wasserdefizit
Y^{Bl} [kg/m ²]	1,6	Ertrag von Blattgemüse
Y^{Pf} [kg/m ²]	2,4	Ertrag von pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse
Y^{Wd} [kg/m ²]	0,85	Bewuchsdichte von Weidepflanzen
λ_v [1/s]	5,70E-07	Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze
ρ_{se} [kg/m ³]	700	Dichte des Sediments