

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Systematische Untersuchung der Exposition von Flora und
Fauna bei Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV
für den Menschen - Vorhaben 3609S70006**

**Auftragnehmer:
Öko-Institut e. V. Darmstadt**

**Chr. Küppers
V. Ustohalova
A. Ulanovsky**

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

BfS-RESFOR-62/12

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201203227814

Salzgitter, März 2012

Systematische Untersuchung der Exposition von Flora und Fauna bei Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV für den Menschen

Abschlussbericht
FKZ 3609S70006

Darmstadt/Neuherberg, 11.10.2011

Öko-Institut e.V.
Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Telefon +49 (0) 6151 - 8191 - 0
Fax +49 (0) 6151 - 8191 - 33

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
D-79017 Freiburg

Büro Berlin
Schicklerstr. 5-7
D-10179 Berlin

Im Auftrag des

Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS)

HelmholtzZentrum münchen
Deutsches Forschungszentrum für
Gesundheit und Umwelt (GmbH)
Arbeitsgruppe Risikoanalyse
Institut für Strahlenschutz
Ingolstädter Landstraße 1
D-85764 Neuherberg

Systematische Untersuchung der Exposition von Flora und Fauna bei Einhaltung der Grenzwerte der StrISchV für den Menschen

Autoren:

Dipl.-Phys. Christian Küppers (Öko-Institut)

Dr.-Ing. Veronika Ustohalova (Öko-Institut)

Dr. Alexander Ulanovsky (HelmholtzZentrum münchen)

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Summary.....	2
1 Einleitung	3
2 Ermittlung von Dosiskonversionskoeffizienten bei Strahlenexposition von Flora und Fauna	5
2.1 Auswahl der berücksichtigten Referenzorganismen.....	5
2.2 Ansatz zur Berücksichtigung von Tochternukliden	7
2.3 Ermittlung der Dosiskonversionskoeffizienten (DCC).....	9
2.3.1 Dosiskonversionskoeffizienten für aquatische Organismen	10
2.3.2 Dosiskonversionskoeffizienten für terrestrische Organismen	13
2.3.2.1 Externe Exposition.....	13
2.3.2.2 Exposition durch Submersion in kontaminierter Luft.....	14
2.3.2.3 Interne Exposition.....	15
2.4 Konzept der Konzentrationsverhältnisse zur Ermittlung der internen Exposition.....	15
2.5 Inhalation durch terrestrische Tiere	16
2.5.1 Konzentrationsverhältnisse für Inhalation bei Säugetieren.....	16
2.5.2 Allometrische Bewertung der biologischen Halbwertszeiten	21
2.5.2.1 Allometrische Beziehung und Parametrisierung nach /USDOE 2002/	22
2.5.2.2 Retention der Erdalkalielemente beim Menschen.....	26
2.5.2.3 Anwendung der allometrischer Beziehungen nach Gleichung (21) auf den menschlichen Körper.....	26
2.5.3 Allometrische Skalierung der biologischen Halbwertszeiten des Menschen auf Tiere	35
2.6 Unsicherheiten der Modellansätze	44
2.7 Ermittelte Dosiskonversionskoeffizienten für die Referenzorganismen	46
3 Ermittlung der im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal zulässigen Kontamination von Luft, Boden und Wasser	50
3.1 Berechnung der Dosis für den Menschen durch Ableitungen radioaktiver Stoffe	50
3.1.1 Ableitungen mit der Fortluft.....	50
3.1.2 Ableitungen mit dem Abwasser in ein Fließgewässer	56
3.1.3 Ableitungen mit dem Abwasser ins Meer.....	59
3.1.4 Berücksichtigung von Tochternukliden	67
3.2 Berechnung der zum Schutz des Menschen notwendigen Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Luft, Boden und Wasser	68
3.2.1 Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Luft.....	68
3.2.2 Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Boden	77
3.2.3 Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Wasser	83

4	Mögliche Strahlenexposition von Flora und Fauna	91
4.1	Strahlenexposition von Flora und Fauna bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft.....	91
4.2	Strahlenexposition von Flora und Fauna bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in Fließgewässer	91
4.3	Strahlenexposition von Flora und Fauna bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in marine Gewässer	98
	Literaturverzeichnis	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Berücksichtigte in Deutschland heimische Referenzorganismen und ihre Lebensräume	6
Tabelle 2-2:	Komponenten der aufgenommenen Fraktion für Aerosole mit AMAD = 1 µm /Silk 1997, ICRP 2002/.....	20
Tabelle 2-3:	Parametrisierung der allometrischen Beziehung (21) für biologische Halbwertszeiten nach /USDOE 2002/	23
Tabelle 2-4:	Parameter der Retentionsfunktion (Gleichung (26)) für Erdalkalielemente basierend auf der ICRP-Publikation 20 /ICRP 1973/.....	26
Tabelle 2-5:	Vergleich zwischen den Parametern für biologische Halbwertszeiten beim Menschen aus den Publikationen der ICRP und den entsprechenden Werten abgeleitet aus allometrischen Beziehungen /Whicker 1982, USDOE 2002/.....	38
Tabelle 3-1:	Ergänzte Transferfaktoren Boden-Weidegras, Boden-Pflanzen, Weide-Milch, Weide-Fleisch, Ingestion-Muttermilch und Inhalation-Muttermilch	56
Tabelle 3-2:	Ergänzte Konzentrationsfaktoren für Süßwasserfisch (in Bq/kg Frischgewicht pro Bq/l).....	58
Tabelle 3-3:	Zuordnung von Elementen zu den drei Elementgruppen der AVV zu § 47 StrlSchV zur Berechnungen der Sedimentation in Fließgewässern	59
Tabelle 3-4:	Konzentrationsfaktoren für marine Nahrungsmittel (in Bq/kg Frischgewicht pro Bq/l).....	60
Tabelle 3-5:	Verzehrsraten mariner Nahrungsmittel für Personen einer kritischen Gruppe nach /NRPB 1995/ und /IAEA 2001/ (in kg/a).....	62
Tabelle 3-6:	Hier verwendete Verzehrsraten mariner Nahrungsmittel für die Referenzpersonen der Strahlenschutzverordnung (in kg/a).....	62
Tabelle 3-7:	Verteilungskoeffizienten zwischen Sediment und Meerwasser nach /IAEA 2004/, ergänzt für dort nicht enthaltene Elemente entsprechend ähnlichem chemischen Verhalten im entsprechenden Milieu (in Bq/kg Trockenmasse pro Bq/l)	64
Tabelle 3-8:	Ermittelte maximal zulässige Emissionen und Aktivitätskonzentrationen in bodennaher Luft (z=0) und in Freisetzungshöhe (z=H)	69
Tabelle 3-9:	Ermittelte maximal zulässige Bodenkontamination in Bq/kg TM	79
Tabelle 3-10:	Ermittelte maximal zulässige Aktivitätskonzentration in Wasser eines Fließgewässers (I) und in marinen Gewässern (II).....	84
Tabelle 4-1:	Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen im Süßwasser bei im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal möglicher Kontamination des Wassers	93

Tabelle 4-2:	Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen im Süßwasser unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen	97
Tabelle 4-3:	Ungünstigste Nuklide und Referenzorganismen in den einzelnen Einleitungsszenarien in ein Fließgewässer.....	98
Tabelle 4-4:	Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen in marinen Gewässern bei im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal möglicher Kontamination des Wassers	99
Tabelle 4-5:	Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen in marinen Gewässern unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen und bestimmten maximalen Ableitungen radioaktiver Stoffe im Jahr	102
Tabelle 4-6:	Ungünstigste Nuklide und Referenzorganismen in den einzelnen Einleitungsszenarien in ein marines Gewässer	103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Energieabhängigkeit der mittleren freien Weglänge einzelner Strahlungsarten.....	12
Abbildung 2-2:	Einkompartiment-Modell zur Modellierung der Strahlenexposition durch Inhalation	18
Abbildung 2-3:	Gegenüberstellung der Modelle von /Whicker 1982/ und /Kitchings 1976/ mit den Originaldaten von /Richmond 1962/.....	25
Abbildung 2-4:	Ergebnis des Fits der experimentellen Daten von /Richmond 1962/	25
Abbildung 2-5:	Retentionsfunktionen für Tritium beim Menschen	27
Abbildung 2-6:	Retentionsfunktionen für Kobalt beim Menschen	28
Abbildung 2-7:	Retentionsfunktionen für Zink beim Menschen	29
Abbildung 2-8:	Retentionsfunktionen für Strontium beim Menschen	30
Abbildung 2-9:	Retentionsfunktionen für Zirkonium beim Menschen	30
Abbildung 2-10:	Retentionsfunktionen für Technetium beim Menschen	31
Abbildung 2-11:	Retentionsfunktionen für Antimon für beim Menschen.....	32
Abbildung 2-12:	Retentionsfunktionen für Iod beim Menschen	32
Abbildung 2-13:	Retentionsfunktionen für Cäsium beim Menschen	33
Abbildung 2-14:	Retentionsfunktionen für Cer beim Menschen	33
Abbildung 2-15:	Retentionsfunktionen für Europium beim Menschen.....	34
Abbildung 2-16:	Retentionsfunktionen für Radium beim Menschen.....	34
Abbildung 2-17:	Retentionsfunktionen für Thorium beim Menschen	35
Abbildung 2-18:	Spezifische BMR ρ für Säugetiere: Punkte aus Daten nach /Jones 2009/, Linie durch Approximation gemäß Gleichung (28)	36

Zusammenfassung

Die Strahlenschutzverordnung legt Grenzwerte für die Dosis von Einzelpersonen der Bevölkerung durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser fest. Auf der Basis der sich daraus ergebenden Beschränkungen wurde für 750 Radionuklide und einen Satz von Referenzorganismen überprüft, ob der Schutz von Flora und Fauna abgedeckt ist. Für die Referenzorganismen wurde die äußere und soweit möglich innere Exposition berechnet. Als neue Pfade wurden die Submersion und die Inhalation (Ratte und Hirsch) einbezogen. Als Kriterium des angemessenen Schutzes wurde auftragsgemäß ein Wert von 10 $\mu\text{Gy/h}$ zu Grunde gelegt.

Für Ableitungen mit der Fortluft ergaben sich keine Überschreitungen der Referenzdosisrate. Bei Ableitungen in Fließgewässer oder marine Gewässer wurden dagegen insbesondere für einige sehr kurzlebige Radionuklide Überschreitungen ermittelt, wenn die noch maximal mögliche Wasserkontamination unterstellt wird. Unter realistischeren Randbedingungen der Emission und Immission ist der Schutz von Flora und Fauna dagegen gewährleistet. Insbesondere für Populationen von Lebewesen, die nur ein kleineres Wasservolumen besiedeln, kann eine Schädigung aber nicht grundsätzlich alleine aufgrund der Anforderungen zum Schutz des Menschen ausgeschlossen werden. In sehr ungünstigen Immissionssituationen muss daher der Einzelfall beurteilt werden.

Summary

Dose limits for members of the public exposed to the discharge of radioactive substances into the air or water bodies are defined in the German Radiation Protection Ordinance. This study tested whether non-human species are protected within the human dose limits for all 750 radionuclides as compared to a set of reference biota. External and, where possible, internal doses were calculated for the reference biota. In addition new exposure pathways such as submersion and inhalation (for rat and deer) were incorporated. The upper limit as ordered for adequate biota protection is 10 $\mu\text{Gy/h}$.

This study found that radionuclide discharges into the air never exceeded the reference dose rate limit. However, violations were detected for discharges of some very short-lived radionuclides into freshwater or seawater, if the maximum water contamination is assumed. Protection of non-human species is guaranteed for more realistic emission and immission situations. This means that damage to populations living in small water volumes cannot be excluded solely on the basis of regulations for the human dose limit. Therefore, it is necessary to judge the individual case in very unfavourable immission situations.

1 Einleitung

Nach den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) ist die Strahlenexposition von Tieren und Pflanzen infolge der Ableitungen radioaktiver Stoffe in die Umwelt abzuschätzen und mit Strahlenexpositionen zu vergleichen, unterhalb derer eine schädigende Wirkung bei Tieren und Pflanzen nicht zu erwarten ist. Grenzwerte zum Schutz der belebten Umwelt werden von der ICRP nicht genannt. Es werden jedoch Referenzspezies (Referenzorganismen) angegeben, die den Betrachtungen zugrunde gelegt werden sollen.

Die Strahlenschutzverordnung legt in § 47 Abs. 1 Grenzwerte für die Dosis von Einzelpersonen der Bevölkerung durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser fest, die bei Planung, Errichtung, Betrieb, Stilllegung, sicheren Einschluss und Abbau kerntechnischer Anlagen oder Einrichtungen einzuhalten sind. Der Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte erfolgt für Referenzpersonen auf Basis der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV (aktueller Entwurf vom 13.05.2005). Die AVV zu § 47 StrlSchV beinhaltet konservative Annahmen zu Aufenthaltszeiten und Verzehrsgewohnheiten von Einzelpersonen der Bevölkerung. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens (FKZ 3609S70006) soll geklärt werden, ob bei der Anwendung der AVV zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte für Einzelpersonen der Bevölkerung auch die belebte Umwelt bereits angemessen geschützt ist.

Die Strahlenexposition sollte für die Referenzorganismen ermittelt werden, die von der ICRP /ICRP 2008b/ sowie in den Forschungsvorhaben FASSET und ERICA /Larsson 2004, Larsson 2008/ betrachtet wurden und im Lebensraum Deutschland heimisch sind. Die Berechnungen der Strahlenexposition und der sich daraus ergebenden adsorbierten Dosis sollten für alle 750 Radionuklide der Anlage VII Teil D StrlSchV unter Berücksichtigung der Tochternuklide durchgeführt werden. In den bislang umfangreichsten Berechnungen zur Exposition der Tiere und Pflanzen - dem ERICA-Projekt - wurden 280 Radionuklide berücksichtigt.

Weiterer Gegenstand dieses Vorhabens war die Ermittlung der bestehenden Lücken bei der Abschätzung der Strahlenexposition von Tieren und Pflanzen und gegebenenfalls erste Ansätze zur Schließung solcher Lücken. Um alle in Anlage VII Teil D StrlSchV aufgeführten Radionuklide einzubeziehen und vorhandene Lücken zu schließen, waren entsprechende Anpassungen der bestehenden Ansätze bzw. die Ableitung neuer Ansätze zur Ermittlung von Dosiskonversionskoeffizienten erforderlich.

Die maximale Kontamination von Lebensräumen infolge der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser, die maßgebend für die Exposition von Tieren und Pflanzen ist, wurde ausgehend aus dem aktuellen Entwurf der AVV zu § 47 StrlSchV abgeschätzt. Randbedingung war dabei die Einhaltung der Grenzwerte für die effektive Dosis sowie die Organdosen gemäß § 47 Abs. 1 StrlSchV für die Referenzpersonen. Die Modelle und Parameterwerte der AVV zu § 47 StrlSchV mussten dabei zum Teil ergänzt werden, insbesondere um Konzentrationen in marinen Biota zu bestimmen. Modellierung, Parameterwerte und Annahmen wurden dabei so gewählt, dass eine Unterschätzung der Strahlenexposition der belebten Natur nicht zu erwarten ist.

Als ein generisches Kriterium des angemessenen Schutzes wurde auftragsgemäß der im ERICA-Projekt abgeleitete Wert von 10 $\mu\text{Gy/h}$ zu Grunde gelegt.

Die Methodik zur Ermittlung der Strahlenexposition von Tieren und Pflanzen wird in Kapitel 2 beschrieben. Dort werden auch die Ergebnisse in Form der ermittelten Dosisumwandlungskoeffizienten genannt. Die Ermittlung der im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal zulässigen Kontamination von Umweltmedien aufgrund der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser und bei Einhaltung der Dosisgrenzwerte für die Referenzpersonen ist Gegenstand des Kapitels 2.6. Aus den möglichen Kontaminationen von Umweltmedien werden in Kapitel 4 die für die Referenzorganismen möglichen Strahlenexpositionen ermittelt und diskutiert. In Kapitel 5 werden die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst.

2 Ermittlung von Dosiskonversionskoeffizienten bei Strahlenexposition von Flora und Fauna

In Kapitel 2 werden die Dosiskonversionskoeffizienten (DCC) bei Strahlenexposition von Flora und Fauna ermittelt. Die Auswahl der zu betrachtenden Referenzorganismen ist in Kapitel 2.1 erläutert. In Kapitel 2.2 wird der Ansatz zur Berücksichtigung des Beitrages von Tochternukliden vorgestellt. Kapitel 2.3 enthält die Herangehensweise bei der Ermittlung der DCC für die externe und interne Exposition für terrestrische und aquatische Referenzorganismen. Da die bisherigen Methoden die DCC für interne Exposition auf die Konzentration der Radionuklide im Körper des Organismus beziehen, im Gegensatz dazu für die hier vorliegende Aufgabenstellung Strahlenexposition jedoch in Bezug auf die Kontamination des Lebensraumes ausgedrückt werden muss, wurde das sogenannte Konzept der Konzentrationsverhältnisse eingeführt. Dieses Konzept wird in Kapitel 2.4 vorgestellt. Eine der Lücken in der gegenwärtigen Methodik zur Schätzung der internen Dosis bei Tieren und Pflanzen ist die Berücksichtigung der Inhalation. Zu deren Berücksichtigung wurde ein Ansatz entwickelt, der in Kapitel 2.5 beschrieben wird.

2.1 Auswahl der berücksichtigten Referenzorganismen

Die Einführung des Konzeptes von Referenztieren und -pflanzen (Reference Animals and Plants - RAPs) und eine umfassende Zusammenstellung dieser Referenzorganismen erfolgte durch die ICRP /ICRP 2008b/ sowie im Rahmen der Forschungsprojekte FASSET und ERICA /Larsson 2004, Larsson 2008/. Im ERICA-Projekt wurden die für europäische Lebensräume typischen Referenztiere und -pflanzen zusammengestellt. Diese Zusammenstellung ist gegenüber /ICRP 2008b/ deutlich umfangreicher. Im Forschungsvorhaben FKZ 3609S70006 sollten die für den Lebensraum Deutschland typischen Referenzorganismen betrachtet werden. Ausgehend vom ERICA-Projekt war hier eine Auswahl der in Deutschland einheimischen Referenzorganismen für die weiteren Untersuchungen zu treffen.

Es wurde ein sogenannter Aufenthaltsfaktor eingeführt, der als relative Aufenthaltszeit im jeweiligen Lebensraum (Wasser, Luft, Boden) über das Jahr (bzw. die Lebensdauer des Organismus) definiert ist. Es wurde bei der Ermittlung der möglichen Strahlenexposition konservativ jeweils vom ungünstigsten Aufenthaltsort ausgegangen, da sich bei der Bearbeitung zeigte, dass die zu ziehenden Schlussfolgerungen von einer detaillierten Spezifizierung unabhängig sind. Somit wurde z. B. für die Berechnung der Dosisraten (hier ausgedrückt in mGy pro Jahr) bei den Ableitungen mit dem Abwasser ein ganzjähriger bzw. lebenslanger Aufenthalt von Vogel, Säugetier

und Amphibie im Wasser angenommen und damit der Aufenthaltsfaktor gleich 1 gesetzt. Für die Amphibie als terrestrischem Organismus wird dagegen abdeckend der dauernde Aufenthalt im Boden und auf dem Boden angenommen.

Bei dieser konservativen Herangehensweise erübrigt sich die Betrachtung der tatsächlich verbrachten Zeiten in den jeweiligen Lebensräumen einzelner Referenzorganismen. Insbesondere ist es nicht erforderlich, unterschiedliches diesbezügliches Verhalten einzelner Spezies, die unter einem Referenzorganismus subsumiert werden können, zu differenzieren.

Die untersuchten Organismen mit ihrer für Deutschland typischen Vertretergruppe sowie die relevanten Lebensräume sind in der Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Berücksichtigte in Deutschland heimische Referenzorganismen und ihre Lebensräume

Terrestrische Organismen					
Referenzorganismus	Lebensraum bzw. Expositionsszenario und jeweiliger Aufenthaltsfaktor				Vertreter (Beispiel)
	im Boden	auf dem Boden	Submersion	Inhalation	
detriphager Wirbelloser	1	1	1		Assel/Laus
fliegendes Insekt		1	1		Hummel, Biene
Flechte und Moos		1	1		Moos
Gastropod	1	1	1		Schnecke
Gräser & Kräuter		1	1		Wildgras
bodenbewohnender Wirbelloser	1				Regenwurm
Amphibie	1	1	1		Grasfrosch
Vogelei		1	1		Entenei
bodengrabendes oder kleines Säugetier	1	1	1	1	Ratte
großes Säugetier		1	1	1	Hirsch
Reptil	1	1	1		Kreuzotter
Watvogel		1	1		Ente
Baum		1	1		Baum
Strauch		1			Brombeere

Fortsetzung Tabelle 2-1

Marine Organismen		
Referenzorganismus	Lebensraum und jeweiliger Aufenthaltsfaktor im Wasser/im Sediment	Vertreter (Beispiel)
Zooplankton	1	-
Seeanemone/Steinkoralle	1	-
Makroalge	1	-
benthisches Weichtier	1	Schnecke
Wurm	1	(Polychaeta), Wattwurm
Gefäßpflanze	1	-
pelagischer Fisch	1	-
Krebs	1	Strandkrabbe
benthischer Fisch	1	Scholle
Reptil (Meeresschildkröte) ¹	nicht in Nord- oder Ostsee lebend	
Säugetier	1	Schweinswal
Seevogel	1	Meerente
Limnische Organismen		
Referenzorganismus	Lebensraum und jeweiliger Aufenthaltsfaktor im Wasser/im Sediment	Vertreter (Beispiel)
Phytoplankton	1	-
Zooplankton	1	-
Krebs	1	-
Insektenlarve	1	Libellenlarve
Gefäßpflanze	1	-
Weichtier	1	Lymnea stagnalis, Schnecke
Gastropod	1	Muschel
pelagischer Fisch	1	Forelle
benthischer Fisch	1	-
Amphibie	1	Frosch
Vogel	1	-
Säugetier	1	Bisamratte

2.2 Ansatz zur Berücksichtigung von Tochternukliden

Bei der Ermittlung der DCC muss neben dem Beitrag des jeweiligen Radionuklids zur Exposition des Organismus auch der Einfluss der Tochternuklide mitberücksichtigt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Berechnungsansätze zur Bestimmung dieses Beitrages vorgestellt. Der Standardansatz, der im ERICA-Projekt implementiert wurde /Brown 2008/, empfiehlt eine Einschränkung der Zerfallsreihe auf

¹ Die in marinen Lebensräumen lebenden Reptilien sind im ERICA-Projekt mitbetrachtet, leben allerdings nicht in den zu Deutschland gehörenden Seewässern.

die ersten Radionuklide, deren Halbwertszeit größer als 10 Tage ist. Weiterhin wird in ERICA angenommen, dass sich alle Glieder dieser Zerfallsreihe in einem sekundären Gleichgewicht befinden und deren Aktivität auf die des Mutternuklids normiert wird. Dieser Ansatz zeigt bestimmte Nachteile, vor allem bei der Betrachtung der natürlichen Zerfallsreihen, wie z. B. der U-238-Reihe und Th-232-Reihe. Im Folgenden werden einige Beispiele zur Berücksichtigung der Tochternuklide aufgeführt /Ulanovsky 2008a/ und anschließend der für dieses Vorhaben gewählte Ansatz vorgestellt.

Alternativ werden relative Aktivitäten der Glieder der Zerfallsreihe als

- Mittelwerte über eine bestimmte Zeitspanne (z. B. Lebensdauer des Organismus) oder
- instantane Aktivitäten zur gegebenen Zeit nach dem Beginn des Mutternuklidzerfalls

definiert.

Für eine Zerfallsreihe v_0, v_1, \dots, v_n , in der der Indizes 0 die Bezeichnung des Mutternuklids darstellt und die Indizes 1 bis n die der Tochternuklide, werden zur Zeit $T = 0$ die relativen Aktivitäten der Nuklide der Zerfallsreihe folgendermaßen definiert:

$$A_j(0) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ 0, & j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

Unter Anwendung der Gleichung (1) kann die Zerfallsreihe durch ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen beschrieben werden. Die Lösung ergibt die zeitliche Entwicklung der Aktivitäten der Nuklide der Zerfallsreihe $A_j(t)$.

Für die Berechnung der Dosiskonversionskoeffizienten werden die Aktivitäten der Nuklide der Zerfallsreihe in Bezug zur Aktivität des Mutternuklids ausgedrückt:

$$a_0(t) = 1, \quad a_j(t) = \frac{A_j(t)}{A_0(t)}, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

Eine andere Vorgehensweise zur Berechnung der Aktivitäten der Tochternuklide ist der Vergleich zeitlich gemittelter Aktivitäten der Nuklide der Zerfallsreihe.

Hier wird der Ansatz der Gleichung (3) aus /Ulanovsky 2008a/ zur Berechnung des Beitrages des radioaktiven Zerfalls zur Strahlenexposition der Fauna angewendet, in welchem eine Mittelung über eine Zeitspanne von einem Jahr erfolgt.

$$\bar{a}_0 = 1, \quad \bar{a}_j = \frac{\int_0^T A_j(t) dt}{\int_0^T A_0(t) dt}, \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Wird also der Beitrag der Radionuklide der Zerfallsreihe bei der Berechnung des gesamten DCC mitberücksichtigt, wird dieser als Summe der DCC für alle Nuklide der Zerfallsreihe folgendermaßen ausgedrückt:

$$D = \sum_{\nu} a_{\nu} D_{\nu} \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

- ν : entweder Mutter- oder Tochternuklid
- a_{ν} : relative Aktivität der jeweiligen Nuklide der Zerfallsreihe
- D_{ν} : Dosiskonversionskoeffizient für die jeweilige Konfiguration von Geometrie der Quelle und dem jeweiligen Nuklid der Zerfallsreihe

2.3 Ermittlung der Dosiskonversionskoeffizienten (DCC)

Mit Hilfe der gegenwärtig verfügbaren Ansätze, die in /USDOE 2002/, /Larsson 2008/ und /ICRP 2008b/ beschrieben sind, werden DCC sowohl für die externe als auch für die interne Strahlenexposition berechnet. Die DCC werden allgemein im Fall der externen Strahlenexposition auf die Bodenkontamination (terrestrische Organismen) oder auf die Aktivitätskonzentration im Wasser (aquatische Organismen) bezogen. Für die interne Exposition werden die DCC üblicherweise auf die Konzentration der Radionuklide im Körper des Organismus bezogen angegeben. In diesem Vorhaben werden dagegen die DCC für die interne Exposition auf die Konzentration des Lebensraumes unter Anwendung geeigneter Konzentrationsverhältnisse (CR), die das Verhältnis zwischen der Konzentration im Organismus und der Konzentration des umgebenden Lebensraumes beschreiben, umgerechnet. Auf diese Weise kann der Bezug zu den zum Schutz des Menschen erforderlichen Begrenzungen der Aktivitätskonzentration in Umweltmedien hergestellt werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ansätze zur Berechnung der DCC vorgestellt.

2.3.1 Dosiskonversionskoeffizienten für aquatische Organismen

Sowohl für externe als auch für interne Exposition werden die DCC nach /Ulanovsky 2006/ ermittelt. Die Berechnungen werden unter der Annahme des gleichmäßigen isotropischen Modells nach /Loevinger 1976/ durchgeführt. In diesem Modell wird der Lebensraum als ein homogenes unendlich ausgedehntes Medium definiert und es wird angenommen, dass die Aktivität homogen über den ganzen Körper des Organismus verteilt ist. Es wird weiterhin angenommen, dass die Dichten des umgebenden Mediums und des Organismus gleich sind. Bei dieser Annäherung werden die DCC für die externe und auch für die interne Exposition als die absorbierte Energiedosisrate pro spezifischer Aktivität der Quelle ($(\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1})/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$) definiert und dann als absorbierte Fraktionen $\phi(E)$ ausgedrückt /Loevinger 1976, Shultis 1996/:

$$D_{\text{int}} = \sum_r \left(\sum_i E_i Y_i \phi_v(E_i) + \int N_r(E) E \phi_v(E) dE \right), \quad (5)$$

$$D_{\text{ext}} = \sum_r \left(\sum_i E_i Y_i (1 - \phi_v(E_i)) + \int N_r(E) E (1 - \phi_v(E)) dE \right) \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

r : Strahlungsart (α -, β -, γ -Strahlung und Spaltfragmente spontaner Spaltung)

E_i : Energie der Strahlung i [MeV]

Y_i : relative Häufigkeit der Strahlung i beim Zerfall des Radionuklids [-]

$N_r(E)$: Energiespektrum der kontinuierlichen Energiestrahlung der Strahlungsart r (hier nur für β -Teilchen²) [MeV^{-1}]

$\phi_v(E)$: absorbierte Fraktion [-]

Gleichung (6) für die externe Exposition stellt eine Näherung dar, die nur für den Fall der gleichen Dichte und der gleichen Elementarzusammensetzung sowohl des Organismuskörpers als auch des umgebenden Mediums geeignet ist.

In einem unendlich ausgedehnten homogenen Medium, welches gleichmäßig mit einer isotropen Strahlungsquelle gefüllt ist, kann der DCC die Absorptionsgrenze - die absorbierte Dosis in einem homogenen unendlichen Medium (siehe z. B. /NCRP 1991/) pro Einheit der Quellstärke - nicht überschreiten. Das heißt, dass die

² In der Terminologie nach /Eckerman et al. 1994/ werden die beim β -Zerfall mit einem kontinuierlichen Energiespektrum entstehenden Elektronen als β -Teilchen bezeichnet, falls es notwendig ist, diese von Elektronen mit diskreter Energie zu unterscheiden (Auger- und Konversionselektronen).

obere Grenze des DCC für jedes Radionuklid durch den Wert der Absorptionsgrenze repräsentiert ist:

$$D_{\infty} \approx 5,76 \cdot 10^{-4} \bar{E} \quad (\mu\text{Gyh}^{-1}\text{Bq}^{-1}\text{kg}) \quad (7)$$

Hierin bedeutet \bar{E} die Energiequelle [MeV], die über das Emissionsspektrum (diskret und/oder kontinuierlich) gemittelt ist:

$$\bar{E} = \sum_{\nu} \left(\sum_i E_i Y_i + \int N_{\nu}(E) E dE \right) \quad (8)$$

Wenn die Organismusgröße deutlich kleiner als der Strahlungsbereich im Medium ist, dann kann die interne Dosis wegen der aus dem Körper austretenden Strahlung gleich Null gesetzt werden. Die externe Dosis nähert sich dem Wert von D_{∞} . Umgekehrt, wenn die Organismusgröße deutlich größer als der Strahlungsbereich im Medium ist, nähert sich die interne Dosis dem Wert von D_{∞} , während die externe Dosis sinkt und gegen Null geht: $D_{\text{ext}} \rightarrow 0$.

Die mittlere freie Weglänge einzelner Strahlungsarten ist in Abbildung 2-1 vergleichend dargestellt:

- die kontinuierlich mit der Energie abnehmende mittlere freie Weglänge („continuous slowing-down Approximation“, CSDA) für Elektronen $\Lambda(E_{\beta})$ (durchgezogene Linie),
- die mittlere freie Weglänge für α -Teilchen $\Lambda(E_{\alpha})$ (punktierte Linie), sowie
- die mittlere freie Weglänge $\Lambda(E_{\gamma})$ für Photonen (gestrichelte Linie).

Alle Bereiche der mittleren freien Weglänge wurden aus /Hubbel 1995/ und /Berger 1999/ abgeleitet und werden für Energien von 10 keV bis 10 MeV angegeben.

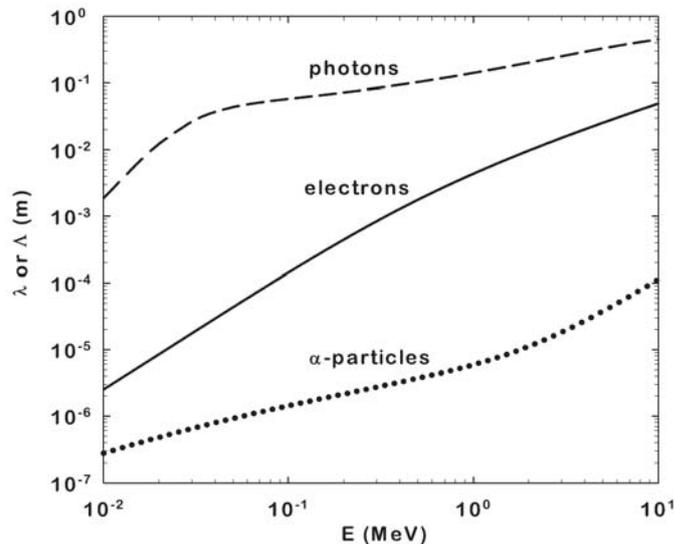


Abbildung 2-1: Energieabhängigkeit der mittleren freien Weglänge einzelner Strahlungsarten

Aus Abbildung 2-1 ist ersichtlich, dass in den praktisch relevanten Energiebereichen die mittleren freien Weglängen der α -Teilchen und energiearmer Elektronen klein sind (kleiner oder gleich 50–100 μm). Dem entsprechend sind deren absorbierten Fraktionen hoch: $\phi_v \approx 1$. Dann sind, wie sich aus den Gleichungen (5) bis (8) ergibt, $D_{\text{int}} \approx D_{\infty}$ und $D_{\text{ext}} \approx 0$. Bei extrem kleinen Organismen und im Fall der hochenergetischen Photonen- und Elektronenstrahlung sind die adsorbierten Fraktionen sehr klein: $\phi_v \ll 1$ und somit $D_{\text{int}} \approx 0$ und $D_{\text{ext}} \approx D_{\infty}$.

Die Methode basiert auf dem gleichförmigen isotropen Modell nach /Ulanovsky 2006/, welches die Berechnung der DCC für aquatische Organismen verschiedener Größen und Formen (Kugel oder Ellipsoid) für die externe und interne Exposition erlaubt. Die Organismussmassen bewegen sich zwischen 1 mg und 10³ kg. Organismusformen wurden mit Hilfe des „Degree of Non-Sphericity“ charakterisiert, der als Verhältnis zwischen der Oberfläche einer Kugel und eines Ellipsoids der gleichen Masse definiert ist. Die Werte des „Degree of Non-Sphericity“ bewegen sich zwischen 0,15 und 1,0.

Die oben genannten Bandbreiten für die Masse und die Form („Degree of Non-Sphericity“) umfassen die meisten in FASSET/ERICA und von der ICRP betrachteten Organismen. Auf diese Weise können Werte auch für Organismen nicht standardisierter Massen und Formen interpoliert werden. Die Methode kann aber auch außerhalb dieser Bandbreiten angewendet werden.

2.3.2 Dosiskonversionskoeffizienten für terrestrische Organismen

2.3.2.1 Externe Exposition

Die Ermittlung der externen Exposition ist im Fall terrestrischer Organismen viel komplexer als bei aquatischen Organismen, da Boden, Luft und organische Substanz sich deutlich in ihrer Zusammensetzung und Dichte unterscheiden. Diese Unterschiede können in einem gleichförmigen isotropen Modell nicht erfasst werden. Deswegen stützen sich die Werte der DCC für externe Exposition terrestrischer Organismen auf Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen der Strahlungsausbreitung in terrestrischen Lebensräumen /Taranenko 2004/. Hier wird nur die externe Exposition durch Photonen betrachtet, während alle Beiträge der α - und β -Partikel zur Dosis wegen deren geringen Eindringtiefe in die Materie vernachlässigt werden, denn das strahlenempfindliche Gewebe ist meistens unter einer strahlenunempfindlichen Schicht aus toter Haut oder Fell gelegen, also außerhalb der Reichweite der Strahlungsarten mit geringer Eindringtiefe.

Die Komplexität der involvierten Prozesse und die Variabilität der Lebensformen erlaubt nicht die Betrachtung aller möglichen Expositionsbedingungen. Deswegen müssen verallgemeinerte Fälle detailliert betrachtet werden, die im Hinblick auf die Strahlungsquelle, die Strahlungsenergie, das kontaminierte Mediums und die Größe des Organismus repräsentativ sind. Für die Expositionsszenarien, bei denen detaillierte Berechnungen nicht durchgeführt wurden, können dann die Werte der DCC interpoliert werden. Folgende Kombinationen von Strahlungsquelle und Referenzorganismus wurden untersucht:

- Externe Exposition der Referenzorganismen auf dem Boden und über dem Boden, verursacht durch eine flächig ausgedehnte Strahlungsquelle in der Tiefe von $0,5 \text{ g/cm}^2$ im Boden (entspricht z. B. bei einer Bodendichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$ einer abschirmenden Bodenschicht von $0,4 \text{ cm}$), die die frisch abgelagerte Aktivität auf der Bodenoberfläche sowie die Oberflächenrauigkeit und Migration umfasst.
- Externe Exposition der Referenzorganismen auf dem Boden und über dem Boden, verursacht durch ein gleichmäßig kontaminiertes Bodenvolumen (obere 10 cm) als Strahlungsquelle, welches als repräsentativ für einen längerfristigen Eintrag der Kontamination angenommen werden kann.
- Externe Exposition der Referenzorganismen, die in der Mitte einer gleichförmig kontaminierten Bodenschicht von 50 cm Dicke als Strahlungsquelle leben.

Die Werte der DCC für externe Exposition der sich auf dem Boden oder in einer bestimmten Höhe über dem Boden befindenden Organismen werden wie folgt berechnet:

$$D_{\text{ext}}(E_{\gamma}) = K_{\text{air}}(E_{\gamma}) \mathcal{R}(E_{\gamma}, M) \quad (9)$$

Hierin bedeuten:

- $K_{\text{air}} E_{\gamma}$: die Luft-Kerma, gemittelt über das vom Organismus ausgefüllte Luftvolumen
 $\mathcal{R}(E_{\gamma}, M)$: Verhältnis von absorbierter Dosis und Luft-Kerma für den Organismus der Masse M und die Photonenenergie E_{γ}

Für die im Boden lebenden Tiere wurden die DCC-Werte direkt mit der Monte-Carlo-Methode berechnet und auf die spezifische Masse des jeweiligen Organismus und die Energie der Strahlungsquelle interpoliert (für eine ausführliche Beschreibung siehe /Taranenko 2004, Ulanovsky 2008/). Die Werte der Massen der terrestrischen Organismen bewegen sich im Fall der externen Exposition auf der Bodenoberfläche zwischen 0,17 g und 550 kg, bei der Exposition im Boden liegen die Werte im Bereich von 0,17 g bis 6,6 kg. Eine direkte Extrapolation außerhalb dieser Bereiche – wie im Fall der aquatischen Organismen – kann nur mit Vorsicht durchgeführt werden.

2.3.2.2 Exposition durch Submersion in kontaminierter Luft

Die externe Exposition der terrestrischen Organismen durch Submersion in kontaminierter Luft ist eine der vorhandenen Lücken in der gegenwärtigen Berechnungsmethodik /Brown 2008, Ulanovsky 2008/. Für dieses Expositionsszenario wurde im Vorhaben FKZ 3609S70006 ein Vergleich zwischen der Exposition des Menschen und der Biota durchgeführt und eine Approximierungsmethode entwickelt, die bei den terrestrischen Tieren angewendet werden kann.

In der Approximation werden Dosiskonversionskoeffizienten für Luft-Kerma $\mathcal{R}(E_{\gamma})$ verwendet, die im Rahmen der Projekte FASSET und ERICA /Taranenko 2004, Ulanovsky 2008/ abgeleitet wurden. Die Werte für $\mathcal{R}(E_{\gamma})$ bringen die im Tierkörper absorbierte mittlere Dosis und die mittlere Kerma des durch den Tierkörper ausgefüllten Luftvolumens in Beziehung. Somit kann für die Strahlungsquellen im Boden und über den Boden eine Luft-Kerma in Luft für unterschiedliche Energien der Photonenquellen $K_{\text{air}}(E_{\gamma})$ berechnet und die Dosis für den ganzen Körper nach Gleichung (10) in $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^3/\text{Bq}$ ermittelt werden:

$$D = \sum_{\gamma} \mathcal{R}(E_{\gamma}) K_{air}(E_{\gamma}) \quad (10)$$

Es wurde über alle Energien des Photonenmissionsspektrums des jeweiligen Radionuklids summiert. Die externe Exposition durch β -Teilchen wurde nicht berechnet.

Die Werte der Luft-Kerma je Einheit der Quellstärke der kontaminierten Luft wurden vom /Eckerman 1993/ übernommen und in die Softwareeinheit implementiert, die in /Ulanovsky 2008/ zur Berechnung der Dosiskonversionsfaktoren für Biota angewendet wurde.

2.3.2.3 Interne Exposition

Die interne Exposition der terrestrischen Organismen wird mit Hilfe der gleichen Methode berechnet, die für die aquatischen Organismen vorgeschlagen wurde /Ulanovsky 2006/, weil dieser Ansatz eine hinreichende Flexibilität bietet. Außerdem sind hier die Beiträge von Elektronen und Photonen der dicht ionisierenden Strahlung zur internen Dosis (α -Teilchen und Fragmente der Spontanspaltung) erfasst. Dabei wurde angenommen, dass diese Strahlungsarten nicht durchdringend sind und deren absorbierte Fraktionen wurden gleich eins gesetzt.

Es ist zu beachten, dass die Werte der DCC unter der Annahme abgeleitet wurden, dass die Strahlung im Körper gleichmäßig verteilt ist. Diese Annahme muss nicht immer gelten. Die maximale Unsicherheit, dass eine interne Strahlungsquelle in dem Körper nicht gleichmäßig verteilt ist, liegt sowohl bei Photonen als auch bei Elektronen eher unter der Grenze von 30 % /Gómez-Ros 2008/. Die in dieser Publikation tabellarisch zusammengefassten Werte der DCC können auch bei der Ermittlung der Organdosis eingesetzt werden. Die absorbierte Dosis überschreitet die mit dem Massenverhältnis des Körpers und der Organen multiplizierte Ganzkörperdosis nicht /Gómez-Ros 2008/.

2.4 Konzept der Konzentrationsverhältnisse zur Ermittlung der internen Exposition

Für das Vorhaben FKZ 3609S70006 wird die interne Exposition der Tiere und Pflanzen zweckmäßigerweise ausgehend von der Kontamination des Lebensraumes (Wasser, Boden, Luft) ausgedrückt, während, wie weiter oben dargestellt, die international vorhandenen Methoden die DCC auf die Konzentration eines Radionuklids im Körper des Organismus ausdrücken.

Zur Ermittlung der internen Exposition von Referenzorganismen als Funktion der Lebensraumkontamination wird üblicherweise das Konzept der Konzentrationsverhältnisse ('concentration ratios' - CR) angewendet, welches die Beziehung zwischen der Konzentration eines Radionuklids in einem Organismus und der Konzentration des Radionuklids im umgebenden Lebensraum ausdrückt. Die gegenwärtigen CRs summieren über die wesentlichen Beiträge zur internen Strahlenexposition /USDOE 2002, Beresford 2008/:

- Ingestion kontaminierter fester Nahrung und kontaminierten Wassers,
- Absorption durch die Haut,
- Inhalation von in die Atemluft resuspendierten Bodenpartikeln bei terrestrischen Organismen /Zach 1985/.

Hier werden die im ERICA-Projekt ermittelten Konzentrationsverhältnisse angewendet, die auch im „Assessment Tool“ des ERICA-Projekts implementiert wurden /Brown 2008/. Insgesamt sind dort Konzentrationsverhältnisse für 31 Elemente aufgeführt. Die Liste der Elemente zusammen mit den Konzentrationsverhältnissen und den entsprechenden Referenzen findet sich in /Beresford 2008/.

Die Inhalation der primär kontaminierten Luft, das heißt der nicht durch die Resuspension kontaminierten Luft, wird nicht explizit in den bisherigen Ansätzen berechnet. Die Entwicklung eines solchen Ansatzes zur Berücksichtigung des Inhalationspfades ist einer der Ziele dieser Arbeit. Die diesbezügliche Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel 2.5 beschrieben.

2.5 Inhalation durch terrestrische Tiere

Eine der Lücken in der gegenwärtigen Methodik zur Schätzung der internen Dosis bei Tieren und Pflanzen ist die Inhalation der primär kontaminierten Luft. Bei einer andauernden Freisetzung oder im Fall der Freisetzung kurzlebiger Radionuklide kann der Inhalationspfad zur gesamten internen Exposition deutlich beitragen.

2.5.1 Konzentrationsverhältnisse für Inhalation bei Säugetieren

Für die Ermittlung der Strahlenexposition durch Inhalation von gasförmigen und an partikulären Schwebstoffen gebundenen Radionukliden können die Konzentrationsverhältnisse CR als eine Beziehung zwischen der im Tierkörper befindlichen Aktivität und der Aktivitätskonzentration der inhalierten Luft angesetzt werden:

$$CR = \frac{Q}{M q_{air}} \quad (11)$$

mit

Q : im Körper befindliche Aktivität [Bq]

M : Körpergewicht [kg]

q_{air} : Aktivitätskonzentration in der Luft [Bq/m³]

Eine vereinfachte Modellbetrachtung der Inkorporation von Radionukliden terrestrischer Tiere durch die Inhalation, die für dieses Vorhaben entwickelt wurde, stützt sich auf die wissenschaftlich weitestgehenden Untersuchungen zur Inkorporation und deren Modellierung beim Menschen (Human Respiratory Tract Model, kurz HRTM, siehe /ICRP 1994a, ICRP 2002/).

Die Aufnahme erfolgt durch Einatmen der kontaminierten Luft. Ein Teil der partikulären Schwebstoffe wird durch Selbstreinigung entfernt (Flimmerepithel der Atemwege). Der Rest der inhalierten radioaktiven Stoffe gelangt in die Lunge und wird absorbiert oder verbleibt in der Lunge sowie in den Bronchien. Verschluckte Partikel aus der Luft gelangen in den Magen-Darm-Trakt (Gastrointestinaler Trakt, GI-Trakt). Der im GI-Trakt absorbierte Teil der Aktivität f_1 trägt zur totalen inkorporierten Aktivität bei (siehe auch Gleichung (13)). Aus dem GI-Trakt können die Radionuklide über Körperflüssigkeiten in andere Gewebe gelangen.

Eine generische Modellierung der Anreicherung von Radionukliden in Organen von Referenzorganismen, wie sie für den menschlichen Körper erfolgt, wäre für die Vielfalt der Arten nicht repräsentativ. Für dieses Vorhaben wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt, das von einem einzigen Kompartiment ausgeht und die zwei wichtigsten Prozesse berücksichtigt, nämlich die Inkorporation der Radionuklide durch Inhalation und die Ausscheidung von Radionukliden. Dieses Einkompartiment-Modell ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

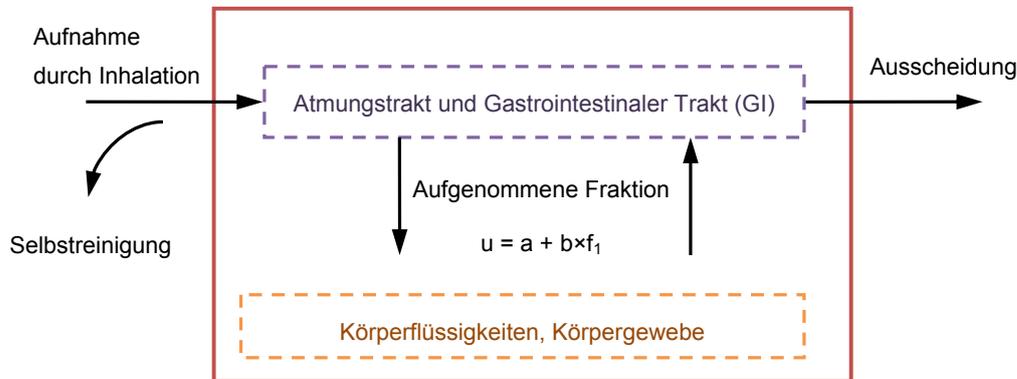


Abbildung 2-2: Einkompartiment-Modell zur Modellierung der Strahlenexposition durch Inhalation

Die Eigenschaften der inhalierten radioaktiven Stoffe, wie die chemische Form (Aerosole und Gase), Partikelgröße, Löslichkeit und Reaktivität, wurden basierend auf dem HRTM Modell der ICRP /ICRP 1994a/ definiert.

Die Ablagerung der Aerosole hängt von deren Partikelgröße ab, die durch den mittleren aktiven aerodynamischen Durchmesser - Activity Median Aerodynamic Diameter (AMAD) - charakterisiert wird. Nach der Ablagerung kann das radioaktive Partikel aus dem Atemtrakt ausgeschieden oder in Körperflüssigkeit gelöst werden. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Absorption im Atemtrakt werden die Aerosole in drei Klassen (F: fast, M: moderate, S: slow) unterteilt. Gase und Dämpfe werden nach deren Löslichkeit und Reaktivität in die Klassen SR-0 (unlöslich und nicht reaktiv), SR-1 (löslich und reaktiv), SR-2 (stark löslich und reaktiv) eingestuft. Gase und Dämpfe, die instantan absorbiert werden können und sehr schnell in die Körperflüssigkeiten gelangen, werden der Absorptionsklasse V (sehr schnell) zugeordnet.

Für das Einkompartiment-Modell wurden die Konzentrationsverhältnisse CR für die Luftinhalation nur für Aerosole mit AMAD = 1 µm und Absorptionsklasse M berechnet.

Die insgesamt inkorporierte Aktivität wird wie folgt berechnet:

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) u R(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

mit

$I(t)$: Rate der aufgenommenen Aktivität zum Zeitpunkt t [Bq/s]

u : Aufnahmefaktor [-], siehe Abbildung 2-2 bzw. Gleichung (14)

$R(t)$: Rückhaltefunktion, beschreibt die Rückhaltung der aufgenommenen Aktivität im gesamten Körper [-]

Die Rate der aufgenommenen Aktivität ist das Produkt aus Aktivitätskonzentration in der Atemluft und der Atemrate:

$$I(t) = q_{air} B e^{-\lambda_r \delta_T} \quad (13)$$

mit

q_{air} : Aktivitätskonzentration [Bq/m³]

B : Atemrate [m³/s]

λ_r : Zerfallsrate (s⁻¹)

δ_T : Zeit, die für den Transport der inhalierten Luft zur Lunge erforderlich ist

Der letzte Term der Gleichung (13) stellt die Transportzeit der inhalierten Aktivität dar und wurde in den Berechnungen gleich 1 s gesetzt.

Der Aufnahmefaktor u berechnet sich aus dem HRTM-Modell /Silk 1997, ICRP 2002/ mit einem Ansatz der Form:

$$u = a + b f_1 \quad (14)$$

Die Werte für die Koeffizienten a und b sind für unterschiedliche Aerosoltypen bei einem AMAD von 1 μm in der Tabelle 2-2 aufgeführt. Die Werte der Fraktion f_1 sind in der ICRP-Publikationsreihe /ICRP 1979, ICRP 1980, ICRP 1981, ICRP 1988, ICRP 1989, ICRP 1993, ICRP 1994b, ICRP 1995a, ICRP 1995b, ICRP 1996/ spezifiziert.

Tabelle 2-2: Komponenten der aufgenommenen Fraktion für Aerosole mit AMAD = 1 µm /Silk 1997, ICRP 2002/

Absorptionsklasse	a (%)	b (%)
F (fast)	24,2	10,6
M (moderate)	8,93	25,7
S (slow)	1,17	33,5

Die Atemrate von Säugetieren wird basierend auf der allometrischen Methode wie folgt beschrieben:

$$B = \alpha M^\beta \quad (15)$$

mit

B : Atemrate [m³/s]

M : Körpergewicht [kg]

α, β : dimensionslose Parameter

Die Werte für die Parameter der Gleichung (15) wurden nach der Empfehlung in /Bride 2000/ wie folgt gewählt: $\alpha = 8,32 \times 10^{-6}$, $\beta = 0,809$.

Unter der Annahme einer konstanten Strahlenexposition des Tieres durch konstante Kontamination der Atemluft wird die Inkorporation nach Gleichung (12) wie folgt ausgedrückt:

$$Q(t) = B(a + b f_1) q_{air} e^{-\lambda_r \delta t} \int_0^t R(t - \tau) d\tau . \quad (16)$$

Die zeitliche Abhängigkeit der inkorporierten Aktivität wird in der Gleichung (16) durch das Integral der Rückhaltefunktion $R(t)$ über die Zeit definiert. Die Rückhaltefunktion, eingeführt in der Gleichung (17) wird üblicherweise als eine lineare Kombination der exponentiellen Terme beschrieben³:

$$R(t) = \sum_i k_i e^{-\lambda_i t} \quad (17)$$

³ Frühere Publikationen der ICRP /ICRP 1960/ hatten die Möglichkeit der Anwendung von Potenzfunktionen für die Beschreibung der Rückhaltung im Körper in Betracht gezogen.

Hierin bedeuten:

λ_i : effektive Verweilkonstante, die aus der Summe der biologischen Verweilkonstanten $\lambda B_{B,i}$ und der radionuklidspezifischen Zerfallsrate λ_r resultiert

k_i : relativer Beitrag verschiedener Komponenten

Die Summe der Werte für k_i ist ≤ 1 . Im Fall, dass einige inhalede Partikel direkt aus den Atemwegen oder Bronchien bzw. der Lunge durch den Selbstreinigungsprozess entfernt werden, ist $k_i < 1$.

Durch Integration der Gleichung (16) folgt:

$$Q(t) = B(a + b f_1) q_{air} e^{-\lambda_r \delta_T} \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (18)$$

Daraus ergibt sich das Konzentrationsverhältnis CR in Gleichung (11) nach folgender Beziehung:

$$\begin{aligned} CR(t) &= \frac{B(a + b f_1) e^{-\lambda_r \delta_T}}{M} \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \\ &= \alpha M^{\beta-1} (a + b f_1) e^{-\lambda_r \delta_T} \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \end{aligned} \quad (19)$$

Bei identischen effektiven Verweilkonstanten über identische Zeiträume kann Gleichung (19) für den Gleichgewichtszustand wie folgt ausgedrückt werden:

$$CR_{eq} = \alpha M^{\beta-1} (a + b f_1) e^{-\lambda_r \delta_T} \sum_i \frac{k_i}{\lambda_i} \quad (20)$$

Die Zerfallsraten der Radionuklide können /ICRP 1983, ICRP 2008a/ oder /Eckerman 1994/ entnommen werden. Die biologische Verweilkonstante ist schwieriger zu bestimmen, da diese gerade bei unterschiedlichen Tierarten von zahlreichen Faktoren abhängt. Der hierzu am intensivsten erforschte Datensatz stammt aus der Forschung zur Strahlenexposition des Menschen.

2.5.2 Allometrische Bewertung der biologischen Halbwertszeiten

Für die Ableitung biologischer Halbwertszeiten durch allometrische Beziehungen gibt es verschiedene Ansätze. In Kapitel 2.5.2.1 werden Basis und Parameter für einige Elemente entsprechend der Zusammenfassung verschiedener Arbeiten in /USDOE 2002/ vorgestellt. Ein spezieller Ansatz der ICRP für Retentionsfunktionen bei Erdalkalimetallen wird in Kapitel 2.5.2.2 beschrieben. In Kapitel 2.5.2.3 werden die ver-

schiedenen Retentionsfunktionen für den Menschen nach ICRP mit den aus allometrischen Modellen nach /USDOE 2002/ ermittelten verglichen.

2.5.2.1 Allometrische Beziehung und Parametrisierung nach /USDOE 2002/

Die allometrische Beziehung für biologische Halbwertszeiten wurde nur für wenige Elemente abgeleitet. Die meisten Autoren beziehen sich auf Whicker und Schultz /Wicker 1982/, wo eine Zusammenfassung aus den früher veröffentlichten Arbeiten für I, Cs, Sr, Co, H enthalten ist. Die letzte Zusammenfassung der Parameter für die allometrische Skalierung der biologischen Halbwertszeiten wurde in /USDOE 2002/ aufgestellt, wo zusätzlich die Werte für Am, Ce, Eu, Pu, Ra, Sb, Tc, Th, U, Zn, Zr aufgeführt sind. Diese wurden ausgehend aus der ICRP Publikation 30 /ICRP 1979, ICRP 1980, ICRP 1981, ICRP 1988/ sowie aus /Higley 2003a/ abgeleitet.

Die am häufigsten angewandte allometrische Beziehung zur Schätzung der biologischen Halbwertszeiten der Organismen lautet:

$$T_{1/2} = \alpha M^{\beta} \quad (21)$$

Die Werte für die Parameter α und β sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst (nach /USDOE 2002/).

Tabelle 2-3: Parametrisierung der allometrischen Beziehung (21) für biologische Halbwertszeiten nach /USDOE 2002/

Element	α	β	Referenz
H	0,82	0,55	Whicker and Schultz (1982)
Co	2,6	0,24	Whicker and Schultz (1982)
Zn	100	0,25	ICRP 30 Part 2 (1980)
Sr	107	0,26	Whicker and Schultz (1982)
Zr	100	0,25	ICRP 30 Part 1 (1980)
Tc	0,3	0,4	ICRP 30 Part 2 (1980)
Sb	0,5	0,25	ICRP 30 Part 3 (1981)
I	6,8	0,13	Whicker and Schultz (1982)
Cs	3,5	0,24	Whicker and Schultz (1982)
Ce	1,4	0,8	ICRP 30 Part 1 (1979)
Eu	1,4	0,8	ICRP 30 Part 3 (1981)
Ra	2	0,25	Schätzung nach K.A. Higley, Oregon State University
Th	3,3	0,81	ICRP 30 Part 1 (1979)
U	0,8	0,28	ICRP 30 Part 1 (1979)
Pu	0,8	0,81	ICRP 30 Part 4 (1988)
Am	0,8	0,81	ICRP 30 Part 4 (1988)

Offensichtliche Unstimmigkeiten bestehen bei der Bestimmung der Parameterwerte für Tritium. In der Tabelle 2-3 werden Werte aufgeführt, die aus /Whicker 1982/ entnommen wurden, und sich wiederum auf die Arbeit von /Kitchings 1976/ beziehen. In /Kitchings 1976/ wurden die Parameterwerte unter Anwendung der Daten aus /Richmond 1962/ abgeleitet. In /Whicker 1982/ wird die allometrische Beziehung für Tritium folgendermaßen definiert:

$$T_{1/2} = 0,82 M(g)^{0,55} \quad (22)$$

Dabei bedeutet M die Körpermasse in g. Die gleiche Beziehung in der Originalquelle /Kitchings 1976/ lautet dagegen:

$$T_{1/2} = 0,82 M(g)^{1,55} \quad (23)$$

Diese Beziehung wird für den Fit der experimentellen Daten von /Richmond 1962/ empfohlen. Tatsächlich werden in der Tabelle 6 in /Kitchings 1976/ abgerundete

Daten von /Richmond 1962/ für alle Tiere außer der Labormaus richtig wiedergegeben. Der in /Kitchings 1976/ aufgeführte Wert $T_{1/2} = 0,1$ für die Labormaus wird dagegen in /Richmond 1962/ als $T_{1/2} = 1,13 \pm 0,14$ angegeben.

Die Modelle von /Whicker 1982, Kitchings 1976/ und die Originaldaten von /Richmond 1962/ werden weiter unten in Abbildung 2-3 gegenübergestellt. Aus dem Vergleich geht hervor, dass weder der Ersterer noch der Letztere die Daten von /Richmond 1962/ wiedergeben. Wird jedoch angenommen, dass es sich bei der Gleichung in /Kitchings 1976/ um einen Druckfehler handelt und der richtige Wert ein Zehntel beträgt, so ergibt sich eine bessere Übereinstimmung mit den Daten von /Richmond 1962/. Die unabhängigen Fits liefern ähnliche Ergebnisse:

- gewichteter Fit zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

$$T_{1/2}(d) = 1,40 M(g)^{0,14} \quad (24)$$

- oder nicht gewichteter Fit

$$T_{1/2}(d) = 1,19 M(g)^{0,152} \quad (25)$$

Gleichung (25) ist der Gleichung (23) von Kitchings et al. ähnlich, weist allerdings einen um etwa den Faktor 10 geringeren Exponenten auf.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde Gleichung (24) für den gewichteten Fit als allometrische Approximation der biologischen Halbwertszeiten von Tritium für Säugetiere übernommen.

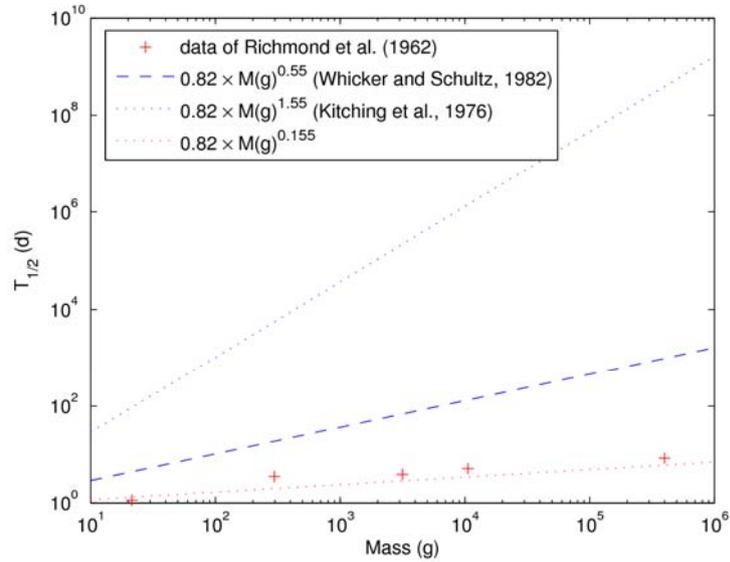


Abbildung 2-3: Gegenüberstellung der Modelle von /Whicker 1982/ und /Kitchings 1976/ mit den Originaldaten von /Richmond 1962/

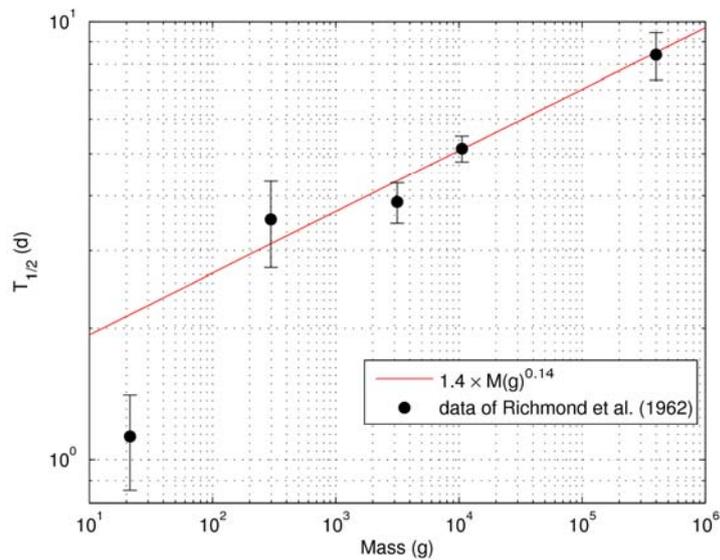


Abbildung 2-4: Ergebnis des Fits der experimentellen Daten von /Richmond 1962/

2.5.2.2 Retention der Erdalkalielemente beim Menschen

In den ICRP-Publikationen 67 und 71 /ICRP 1993, ICRP 1995/ werden Dosiskoeffizienten für die Erdalkalielemente Ca, Sr, Ba, and Ra aufgeführt, die basierend auf dem komplexen Multikompartiment-Modell des menschlichen Körpers für den Metabolismus dieser sich in Knochen einlagernden Elemente berechnet wurden. Es zeigt sich, dass es nicht empfehlenswert ist, diese biologischen Halbwertszeiten in dem vereinfachten Einkompartiment-Modell für Referenzspezies anzusetzen.

Um sich an den Rahmen der internationalen Empfehlungen zu halten, wurde für dieses Vorhaben der Ansatz der ICRP-Publikation 56 /ICRP 1989/ für Ca angewendet. Konkret wurde die Retentionsfunktion für Erdalkalielemente aus der ICRP-Publikation 20 /ICRP 1973/ übernommen. Die Retentionsfunktionen wurden mit Hilfe der Gleichung (26), einer Summe von drei Exponentialtermen, für Erdalkalielemente abgeleitet.

$$R(t) = a \exp\left(-\frac{\ln(2)t}{T_A}\right) + b \exp\left(-\frac{\ln(2)t}{T_B}\right) + c \exp\left(-\frac{\ln(2)t}{T_C}\right) \quad (26)$$

Gleichung (26) entspricht der in /ICRP 1989/ aufgeführten Gleichung für Ca. Die entsprechenden Parameter und ihre Werte werden in Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-4: Parameter der Retentionsfunktion (Gleichung (26)) für Erdalkalielemente basierend auf der ICRP-Publikation 20 /ICRP 1973/

Element	a	T _A (d)	b	T _B (d)	c	T _C (d)
Ca	0,5686	8,69	0,1288	248	0,0815	3809
Sr	0,5905	4,35	0,1027	310	0,1133	4525
Ba	0,5031	1,38	0,0514	171	0,034	2832
Ra	0,5137	2,22	0,0711	101	0,021	3121

Die Retentionsfunktion (Gleichung (26)) in Verbindung mit den in der Tabelle 2-4 aufgeführten Parametern wird im Folgenden zur Darstellung der Retentionsfunktion des Menschen angewendet.

2.5.2.3 Anwendung der allometrischer Beziehungen nach Gleichung (21) auf den menschlichen Körper

Im Weiteren erfolgt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen bei Anwendung der allometrischen Beziehung nach Gleichung (21) unter Verwendung der Parameter der

Tabelle 2-3 auf den menschlichen Körper (Körpermasse 70 kg) und mit der im biokinetischen Modell der ICRP definierten Retentionsfunktion für eine Auswahl von Elementen. Diese Auswahl umfasst sowohl Fälle, in denen sich die schnellere Retention einerseits im allometrischen Ansatz oder andererseits nach dem biokinetischen Modell der ICRP ergibt, als auch Fälle, in denen es vom betrachteten Zeitpunkt abhängig ist, nach welchem Ansatz die schnellere Retention erfolgt. Aus der Gegenüberstellung ist ersichtlich, dass die allometrisch abgeleiteten Funktionen die Daten für den Menschen in den meisten Fällen nicht wiedergeben können. Dies liegt vor allem an der Annahme der einfachen exponentiellen Darstellung.

Tritium

Aus Abbildung 2-5 ist ersichtlich, dass die in /USDOE 2002/ empfohlene allometrische Parametrisierung zur Bestimmung der Halbwertszeit die Retentionsfunktion für den menschlichen Körper bei Tritium nicht wiedergeben kann (blaue Linie). Andererseits bildet die Parametrisierung relativ gut den „schnellen“ Retentionsanteil aus der Gleichung (24) für das tritiierte Wasser (TW, grüne durchgezogene Linie) ab. Als schwarze durchgezogene Linie wird die Retentionsfunktion für mittlere Halbwertszeiten nach /Melintescu 2010/ abgebildet. Die Daten aus /Melintescu 2010/ beziehen sich auf C-14 sowie organisch gebundenes Tritium (OBT) und basieren auf den Halbwertszeiten, die dem arithmetischen Mittel der langsamen und schnellen Retention entsprechen.

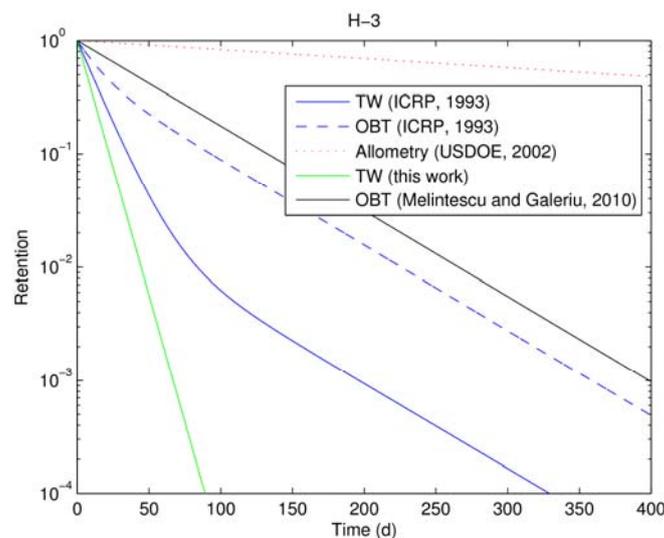


Abbildung 2-5: Retentionsfunktionen für Tritium beim Menschen

Kobalt (Co)

Die allometrische Näherung nach /USDOE 2002/ kann die 50-prozentige sofortige Ausscheidung, die bei Kobalt von der ICRP im Modell für den Menschen empfohlen wird, nicht wiedergeben (siehe Abbildung 2-6). Die Halbwertszeit von 37,8 d, die sich aus der allometrischen Gleichung (21) ergibt, ist dagegen in einer guten Übereinstimmung mit der mittleren Halbwertszeit von 19,3 d nach ICRP, die die 50-prozentige sofortige Retention des Modells für den Menschen mitberücksichtigt.

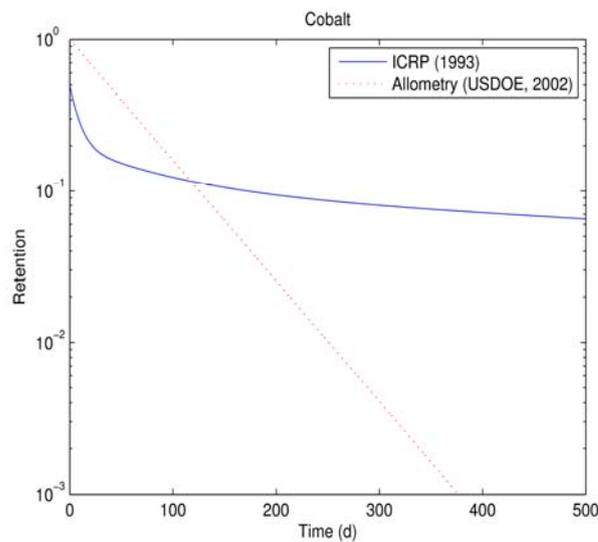


Abbildung 2-6: Retentionsfunktionen für Kobalt beim Menschen

Zink (Zn)

Aus Abbildung 2-7 ist ersichtlich, dass die allometrisch abgeleitete Retentionsfunktion bei Zink die Kinetik der Retention des menschlichen Körpers nicht wiedergeben kann.

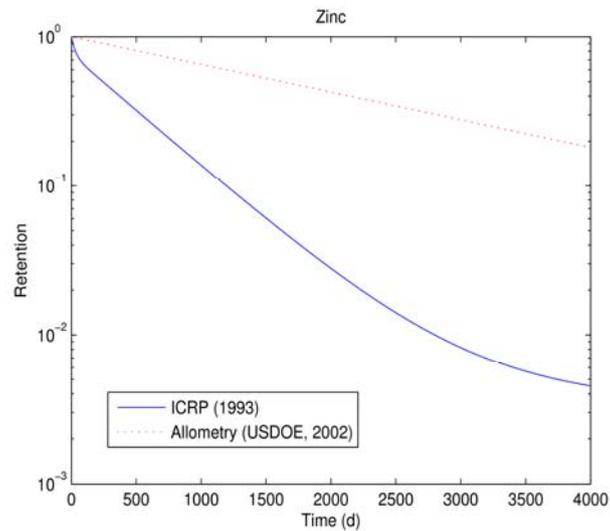


Abbildung 2-7: Retentionsfunktionen für Zink beim Menschen

Strontium (Sr)

Die in Abbildung 2-8 dargestellten Retentionsfunktionen für den Menschen bei Aufnahme von Strontium basieren auf den Ansätzen für Erdalkalimetalle der ICRP-Publikation 20 /ICRP 1973/ mit einer Summe exponentieller Terme. Wie aus Abbildung 2-8 ersichtlich, stimmt die allometrisch abgeleitete Retentionsfunktion (rote gepunktete Linie) nicht mit der der ICRP-Publikation 20 /ICRP 1973/ überein.

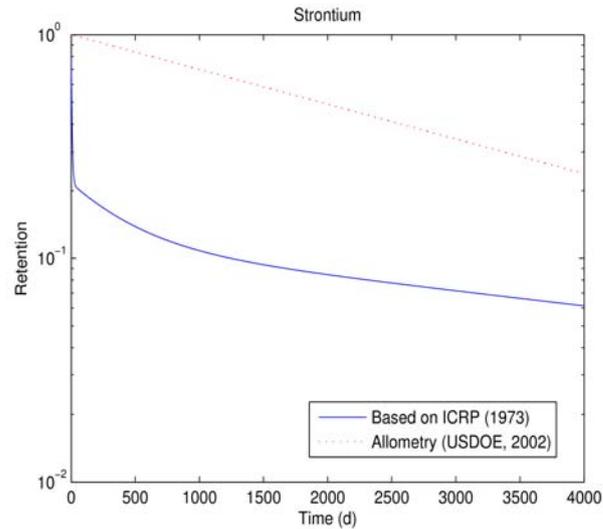


Abbildung 2-8: Retentionsfunktionen für Strontium beim Menschen

Zirkonium (Zr)

Ähnlich wie bei Kobalt kann auch für Zirkonium die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die allometrische Retentionsfunktion nicht mit der Retentionsfunktion aus der ICRP-Publikation 67 /ICRP 1993/ überein stimmt (siehe Abbildung 2-9).

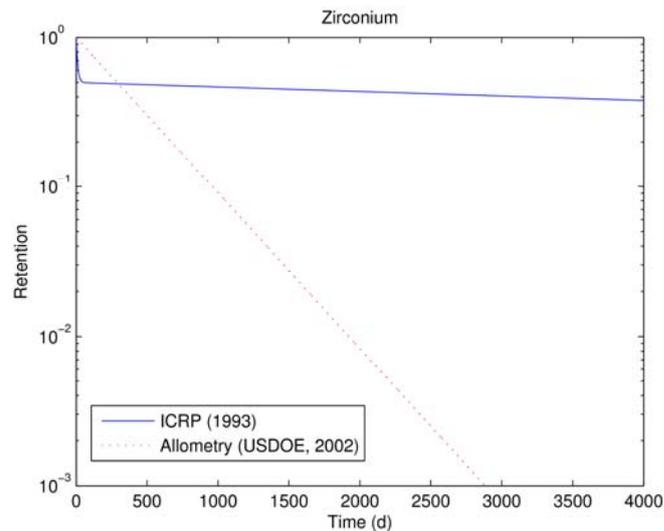


Abbildung 2-9: Retentionsfunktionen für Zirkonium beim Menschen

Technetium (Tc)

Die allometrische Retentionsfunktion gibt bei Technetium relativ gut die langsame Komponente der Ausscheidung wieder. Die schnelle Komponente weicht dagegen stark von /ICRP 1993/ ab (siehe Abbildung 2-10).

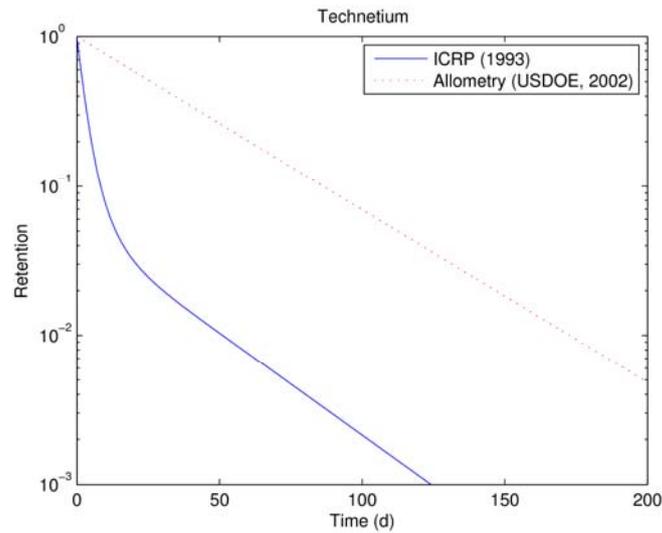


Abbildung 2-10: Retentionsfunktionen für Technetium beim Menschen

Antimon (Sb)

Im Gegensatz zu Technetium stimmt die schnelle Komponente ($T_{1/2} = 5$ d) mit der allometrischen Retentionsfunktion für Antimon ($T_{1/2} = 8,1$ d) besser überein als die langsame Komponente ($T_{1/2} = 100$ d und 5000 d) (siehe Abbildung 2-11).

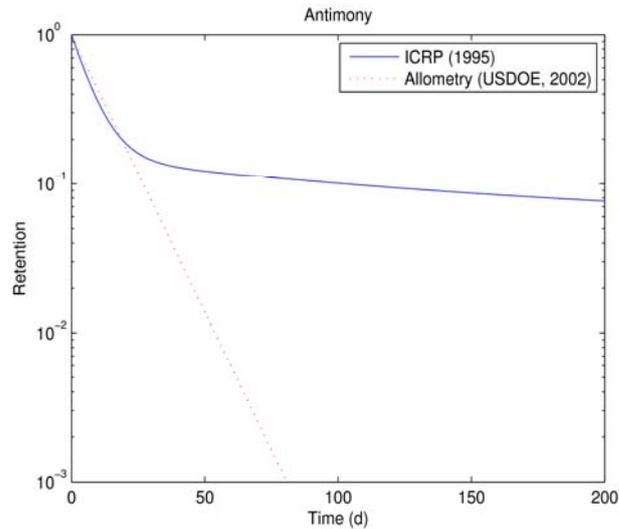


Abbildung 2-11: Retentionsfunktionen für Antimon für beim Menschen

Iod (I), Cäsium (Cs), Cer (Ce), Europium (Eu), Radium (Ra), Thorium (Th)

Auch für die Elemente I, Cs, Ce, Eu, Ra und Th wurden Vergleiche zwischen dem allometrischen Ansatz und Ergebnissen in ICRP-Publikationen gezogen. Diese sind in den Abbildungen 2-12 bis 2-17 dargestellt. Zufriedenstellende Übereinstimmungen zeigen sich bei keinem dieser Elemente.

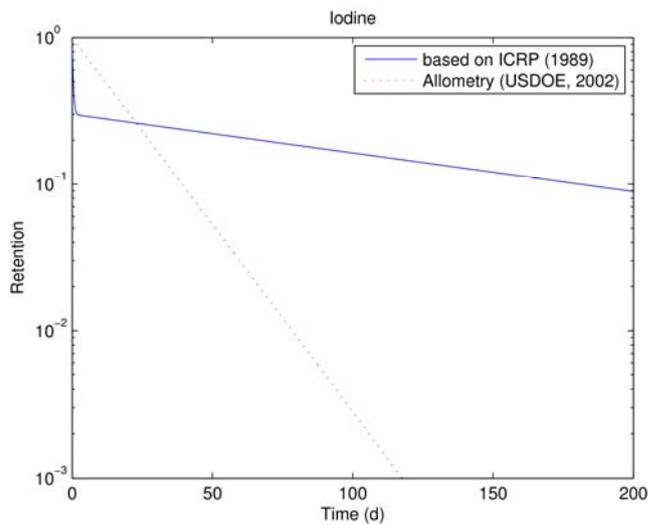


Abbildung 2-12: Retentionsfunktionen für Iod beim Menschen

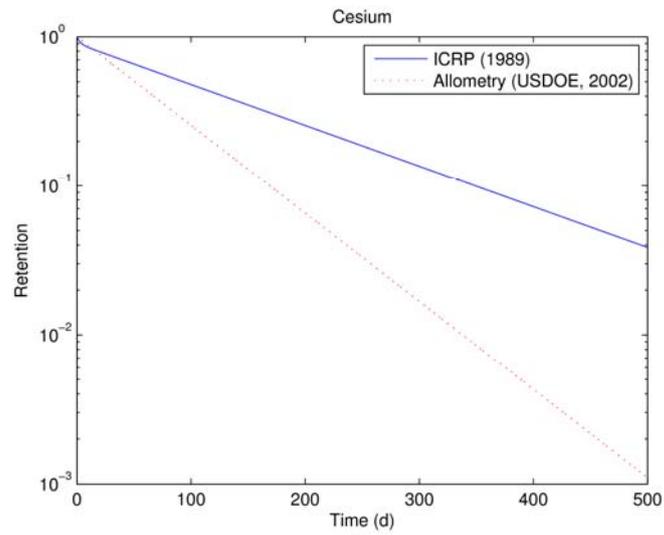


Abbildung 2-13: Retentionsfunktionen für Cäsium beim Menschen

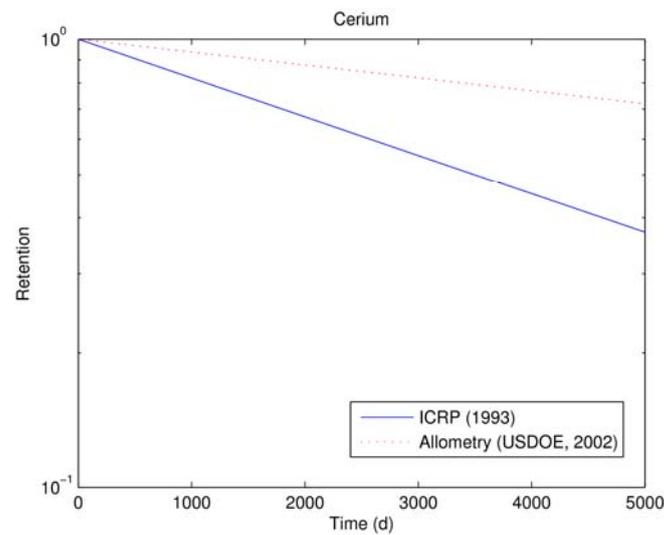


Abbildung 2-14: Retentionsfunktionen für Cer beim Menschen

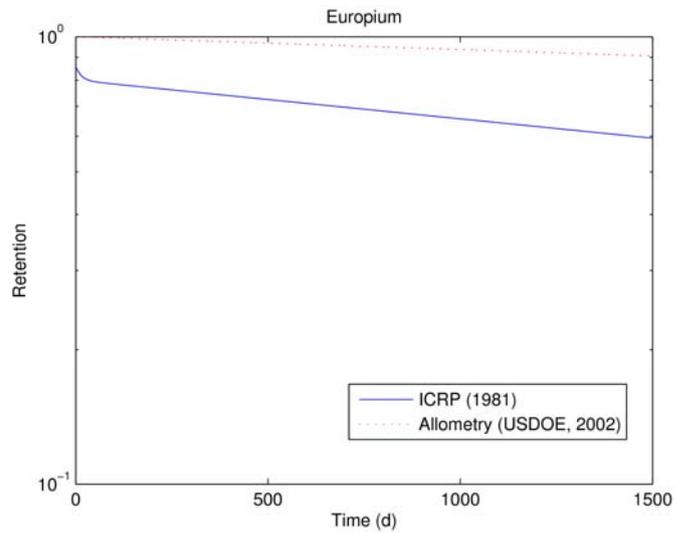


Abbildung 2-15: Retentionsfunktionen für Europium beim Menschen

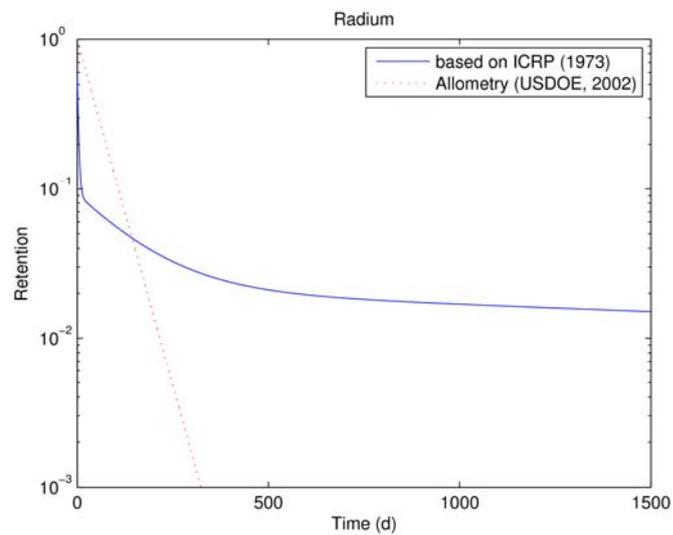


Abbildung 2-16: Retentionsfunktionen für Radium beim Menschen

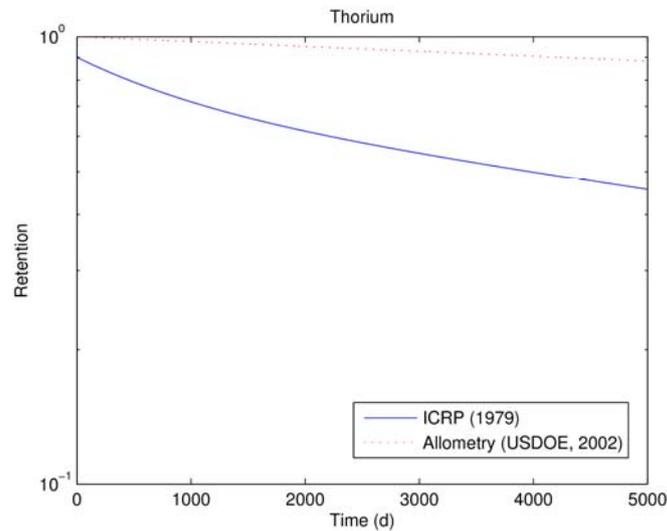


Abbildung 2-17: Retentionsfunktionen für Thorium beim Menschen

2.5.3 Allometrische Skalierung der biologischen Halbwertszeiten des Menschen auf Tiere

Die Bestimmung und Systematisierung biologischer Halbwertszeiten auf der Basis allometrischer Beziehungen wurde in der Biologie intensiv untersucht (siehe z. B. /Marquet 2005, West 2005, White 2005/). Allometrische Beziehungen finden eine entsprechend breite Anwendung bei der Abschätzung von relativen Aktivitätskonzentrationen und biologischen Halbwertszeiten für Biota (siehe z. B. /Whicker 1982, Higley 2003b, Higley 2007, Vives 2007, Vives 2009/). Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, werden oft unterschiedliche Datensätze für die allometrischen Ansätze verwendet, die manchmal auch Fehler enthalten können.

Im Rahmen des Vorhabens FKZ 3609S70006 wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem eine allometrische Skalierung von Parametern zur Ermittlung von biologischen Halbwertszeiten des Menschen auf Säugetiere möglich ist. Die Ableitung sollte auf dem in ICRP abgeleiteten umfangreichen Datensatz für den Menschen basieren und unter Anwendung der ausführlichen Messungen des Grundumsatzes (basal metabolic rate: BMR) nach /Jones 2009/ durchgeführt werden. Letzteres kann zur Ableitung der allometrischen Skalierung der biologischen Halbwertszeiten in Abhängigkeit von den Körpermassen der Organismen angewendet werden.

Die Datensätze für den Menschen sind in /ICRP 1979, ICRP 1980, ICRP 1981, ICRP 1988, ICRP 1989, ICRP 1993, ICRP 1994a, ICRP 1994b, ICRP 1995a, ICRP 1995b, ICRP 1996/ veröffentlicht. Die biologische Verweilkonstante λ_b wurde von /Jones

2009/ aus der BMR und der Analyse der Körpermasse nach /Clarke 2010/ näherungsweise abgeschätzt. Als Indikator für die Summe der biologischen Prozesse der Ausscheidung von Radioaktivität kann die spezifische BMR (Energieumsatz pro Körpermasse) als Funktion der Körpermasse angesetzt werden:

$$\rho = \frac{BMR}{M} \quad (27)$$

Die spezifische BMR ρ aus den Daten nach /Jones 2009/ ist in Abbildung 2-18 als blaue Punkte eingetragen. Die rote Kurve stellt einen Fit dar gemäß folgendem quadratischen Polynom:

$$\ln \rho = a \ln^2 M + b \ln M + c \quad (28)$$

Die Parameterwerte betragen bei diesem Fit: $a=0,01425$, $b=-0,2734$ und $c=0,9394$.

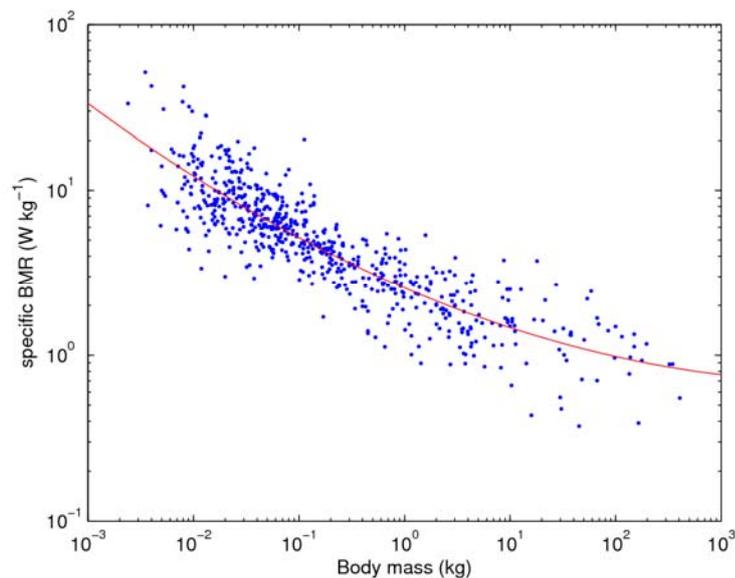


Abbildung 2-18: Spezifische BMR ρ für Säugetiere: Punkte aus Daten nach /Jones 2009/, Linie durch Approximation gemäß Gleichung (28)

Unter der Annahme, dass die spezifische BMR ρ und die biologische Halbwertszeit $T_b = \ln 2 / \lambda_b$ umgekehrt proportional zueinander sind, kann folgende Gleichung zur Skalierung der biologischen Halbwertszeiten für den Menschen angewendet werden:

$$T_b(M) = T_{b,0} \frac{\rho_0}{\rho(M)} = T_{b,0} \left(\frac{M_0}{M} \right)^{a \ln(M_0 M) + b} \quad (29)$$

In dieser Gleichung stellen die Indizes 0 die für den Menschen spezifischen Werte dar.

Mit Gleichung (30) kann die Retention für ein Säugetier der Masse M berechnet werden:

$$\lambda_b(M) = \frac{\ln 2}{T_b(M)} = \lambda_{b,0} \left(\frac{M}{M_0} \right)^{a \ln(M_0 M) + b} \quad (30)$$

Durch die Skalierung der biologischen Halbwertszeiten in Gleichung (30) kann das sich einstellende Gleichgewicht für das Konzentrationsverhältnis der Inhalation terrestrischer Säugetiere abgeschätzt werden. In Tabelle 2-5 sind die biologischen Halbwertszeiten ausgehend von den Publikationen der ICRP und der hier abgeleiteten Näherung für Erdalkalielemente nach Gleichung (26) zusammengestellt. Die Parameter der einfachen exponentiellen allometrischen Approximation (Gleichung (21) und Tabelle 2-3), die dem menschlichen Körper mit einer Masse von 70 kg entsprechen, sind zum Vergleich ebenfalls in Tabelle 2-4 aufgeführt.

Die in diesem Vorhaben durchgeführte allometrische Skalierung erlaubt die Berechnung der Inhalationsdosis für Säugetiere für eine wesentlich größere Zahl von Elementen als dies bisher der Fall war.

In Tabelle 2-5 sind elementspezifische Daten aus den ICRP-Publikationen für die Retentionsfunktion nach Gleichung (26) dargestellt, erweitert auf vier Exponentialterme. Angegeben ist auch der absorbierte Teil f_1 der Aktivität für Ingestion und Inhalation (Absorptionsklasse M/medium bei Inhalation). Für den Menschen mit 70 kg Körpermasse sind die allometrisch abgeleiteten Daten gemäß Gleichung (21) und Tabelle 2-3 zum Vergleich dargestellt⁴.

⁴ $T_{1/2}$ ergibt sich aus α und β , wenn die Masse des Menschen in g eingesetzt wird. In der Literatur werden für die Masse teils Werte in g (z. B. /Whicker 1982/ und große Teile in /USDOE 2002/) und teils Werte in kg (z. B. Tabelle 4.5 in /USDOE 2002/) verwendet.

Tabelle 2-5: Vergleich zwischen den Parametern für biologische Halbwertszeiten beim Menschen aus den Publikationen der ICRP und den entsprechenden Werten abgeleitet aus allometrischen Beziehungen /Whicker 1982, USDOE 2002/

Nr.	Element (chem. Verbin- dung)	Daten für den Menschen aus den ICRP-Publikationen									Mensch (allometrisch)			Bemerkung	
		Parameter der Retentionsfunktion								f_1		α	β		T(d)
		a	T _A (d)	b	T _B (d)	c	T _C (d)	d	T _D (d)	Ingesti- on	Inhalation (M)				
1	H (HTO)	0,97	10	0,03	40					1	0,1	1,4	0,14	6,7	HTO = tritiiertes Wasser
1	H (OBT)	0,5	10	0,5	40					1	0,1	1,4	0,14	6,7	OBT = organisch gebundenes Tritium
2	He														ICRP-Modell existiert nicht
3	Li														ICRP-Modell existiert nicht
4	Be	0,4	1500	0,16	15	0,04	500			0,005	0,005				40% sofortige Ausscheidung
5	B														ICRP-Modell existiert nicht
6	C (OC)	1	40							1	0,1				OC = organischer Kohlenstoff
6	C (CO ₂)	0,18	0,0035	0,81	0,04	0,01	40			1	0,1				CO ₂ = Kohlendioxid
7	N														Modell existiert nicht
8	O														Modell existiert nicht
9	F	1	unend- lich							1	1				
10	Ne														ICRP-Modell existiert nicht
11	Na	0,997	10	0,003	500					1	1				
12	Mg	0,8	100							0,5	0,5				20% über sofortige Ausscheidung
13	Al	1	100							0,01	0,01				
14	Si	0,4	5	0,6	100					0,01	0,01				
15	P	0,3	500	0,15	2	0,4	19			0,8	0,8				15% über sofortige Ausscheidung
16	S (anorga- nisch)	0,15	20	0,05	2000					1	0,1				80% über sofortige Ausscheidung

Fortsetzung Tabelle 2-5

Nr.	Element (chem. Verbin- dung)	Daten für den Menschen aus den ICRP Publikationen										Mensch (allometrisch)			Bemerkung
		Parameter der Retentionsfunktion								f_1		α	β	T(d)	
		a	$T_A(d)$	b	$T_B(d)$	c	$T_C(d)$	d	$T_D(d)$	Ingesti- on	Inhalation (M)				
16	S (orga- nisch)	1	140							1	0,8				
17	Cl	1	10							1	1				
18	Ar														ICRP-Modell existiert nicht
19	K	1	30							1	1				
20	Ca	0,569	8,685	0,129	248	0,082	3809			0,3	0,1				Approximation der Funktionen aus ICRP 20
21	Sc	0,1	5	0,8	1500					0,0001	0,0001				10% über sofortige Ausscheidung
22	Ti	1	600							0,01	0,01				
23	V	0,25	10000	0,05	10000					0,01	0,01				70% über sofortige Ausscheidung
24	Cr	0,05	1000	0,4	6	0,25	80			0,1	0,1				30% über sofortige Ausscheidung
25	Mn	0,7	40	0,3	4					0,1	0,1				
26	Fe	1	2000							0,1	0,1				ICRP 30 Teil2
27	Co	0,3	6	0,1	60	0,1	800			0,1	0,1	2,6	0,24	37,8	50% über sofortige Ausscheidung
28	Ni	0,02	0,2	0,3	1200					0,05	0,05				68% über sofortige Ausscheidung
29	Cu	1	40							0,5	0,5				
30	Zn	0,755	400	0,24	20	0,005	10000			0,5	0,1	100	0,25	1627	
31	Ga	0,3	1	0,7	50					0,001	0,001				
32	Ge	0,5	0,02	0,5	1					1	1				
33	As	0,39	10	0,26	1					0,5	0,5				35% über sofortige Ausscheidung
34	Se	0,1	3	0,4	30	0,5	200			0,8	0,1				

Fortsetzung Tabelle 2-5

Nr.	Element (Chem. Verbin- dung)	Daten für den Menschen aus den ICRP Publikationen										Mensch (allometrisch)			Bemerkung
		Parameter der Retentionsfunktion								f_1		α	β	T(d)	
		a	T _A (d)	b	T _B (d)	c	T _C (d)	d	T _D (d)	Ingesti- on	Inhalation (M)				
35	Br	1	10							1	1				
36	Kr														ICRP-Modell existiert nicht
37	Rb	1	44							1	1				
38	Sr	0,590	4,35	0,103	310	0,113	4525			0,3	0,1	107	0,26	1946	Approximationsfunktion aus ICRP 20
39	Y	0,75	infinite							0,5	0,5				25% über sofortige Ausscheidung
40	Zr	0,5	10000	0,5	7					0,01	0,002	100	0,25	1627	
41	Nb	0,5	6	0,5	200					0,01	0,01				
42	Mo	0,1	1	0,9	50					1	0,1				
43	Tc	0,75	1,6	0,2	3,7	0,05	22			0,5	0,1	0,3	0,4	26,0	
44	Ru	0,35	8	0,3	35	0,2	1000			0,05	0,05				
45	Rh	0,35	8	0,3	35	0,2	1000			0,05	0,05				
46	Pd	0,7	15							0,005	0,005				30% über sofortige Ausscheidung
47	Ag	0,1	3,5	0,8	50	0,1	500			0,05	0,05				
48	Cd	1	9125							0,05	0,05				
49	In	1	infinite							0,02	0,02				
50	Sn	0,1	4	0,1	25	0,3	400			0,02	0,02				50% über sofortige Ausscheidung
51	Sb	0,85	5	0,1	100	0,05	5000			0,1	0,01	0,5	0,25	8,1	
52	Te	0,25	10000	0,25	20					0,3	0,1				50% über sofortige Ausscheidung
53	I	0,7	0,25	0,3	114					1	0,1	6,8	0,13	29,0	Approximation unter Anwendung der Daten aus ICRP 56
54	Xe														ICRP-Modell existiert nicht

Fortsetzung Tabelle 2-5

Nr.	Element (Chem. Verbindung)	Daten für den Menschen aus den ICRP Publikationen										Mensch (allometrisch)			Bemerkung
		Parameter der Retentionsfunktion								f_1		α	β	T(d)	
		a	$T_A(d)$	b	$T_B(d)$	c	$T_C(d)$	d	$T_D(d)$	Ingestion	Inhalation (M)				
55	Cs	0,1	2	0,9	110					1	0,1	3,5	0,24	50,9	
56	Ba	0,5031	1,38	0,0514	171,2	0,0340	2831,5			0,2	0,1				Approximationsfunktion aus ICRP 20
57	La	1	3500							0,0005	0,0005				
58	Ce	1	3500							0,3	0,3	1,4	0,8	10525	
59	Pr	0,05	10	0,85	3500					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
60	Nd	0,9	3500							0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
61	Pm	0,9	3500							0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
62	Sm	0,9	3500							0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
63	Eu	0,06	10	0,8	3500					0,0005	0,0005	1,4	0,8	10525	14% über sofortige Ausscheidung
64	Gd	0,03	10	0,75	3500					0,0005	0,0005				22% über sofortige Ausscheidung
65	Tb	0,05	10	0,75	3500					0,0005	0,0005				20% über sofortige Ausscheidung
66	Dy	0,02	10	0,7	3500					0,0005	0,0005				28% über sofortige Ausscheidung
67	Ho	0,05	10	0,8	3500					0,0005	0,0005				15% über sofortige Ausscheidung
68	Er	0,75	3500							0,0005	0,0005				25% über sofortige Ausscheidung
69	Tm	0,79	3500							0,0005	0,0005				21% über sofortige Ausscheidung
70	Yb	0,02	10	0,535	3500					0,0005	0,0005				44,5% über sofortige Ausscheidung
71	Lu	0,005	10	0,62	3500					0,0005	0,0005				37,5% über sofortige Ausscheidung
72	Hf	0,5	7	0,5	8000					0,0002	0,0002				
73	Ta	0,35	8	0,65	100					0,001	0,001				
74	W	0,0225	5	0,01	100	0,0175	1000			0,3	0,3				95% über sofortige Ausscheidung

Fortsetzung Tabelle 2-5

Nr.	Element (Chem. Verbin- dung)	Daten für den Menschen aus den ICRP Publikationen										Mensch (allometrisch)			Bemerkung
		Parameter der Retentionsfunktion								f_1		α	β	T(d)	
		a	T_A (d)	b	T_B (d)	c	T_C (d)	d	T_D (d)	Ingesti- on	Inhalation (M)				
75	Re	0,04	0,5	0,72	1,6	0,192	3,7	0,048	22	0,8	0,8				
76	Os	0,16	8	0,64	200					0,01	0,01				20% über sofortige Ausscheidung
77	Ir	0,16	8	0,64	200					0,01	0,01				20% über sofortige Ausscheidung
78	Pt	0,76	8	0,04	200					0,01	0,01				20% über sofortige Ausscheidung
79	Au	1	3							0,01	0,01				
80	Hg (anor- ganisch)	0,95	40	0,05	10000					0,02	0,02				
80	Hg (orga- nisch)	0,95	80	0,05	10000					0,4	0,4				
81	Tl	1	10							1	1				f1 für Inhalation muss überprüft werden
82	Pb	0,36	12	0,191	180	0,119	10000			0,2	0,1				
83	Bi	0,42	0,6	0,28	5					0,05	0,05				30% über sofortige Ausscheidung
84	Po	1	50							0,5	0,1				f1=0,1 für Ingestion von Wasser
85	At	1	10							1	1				
86	Rn														ICRP-Modell existiert nicht
87	Fr	1	infinite							1	1				
88	Ra	0,5137	2,22	0,0711	100,5	0,0210	3121			0,2	0,1	2	0,25	32,5	Approximationsfunktion aus ICRP 20
89	Ac	0,45	14610	0,45	36525					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
90	Th	0,2	700	0,7	8000					0,0005	0,0005	3,3	0,81	27736	10% über sofortige Ausscheidung
91	Pa	0,4	36525	0,109	10	0,061	60			0,0005	0,0005				43% über sofortige Ausscheidung
92	U	0,24	6	0,2	20	0,023	5000	0,001	1500	0,02	0,2	0,8	0,28	18,2	54,6% über sofortige Ausscheidung

Fortsetzung Tabelle 2-5

Nr.	Element (Chem. Verbin- dung)	Daten für den Menschen aus den ICRP Publikationen										Mensch (allometrisch)			Bemerkung
		Parameter der Retentionsfunktion								f_1		α	β	T(d)	
		a	$T_A(d)$	b	$T_B(d)$	c	$T_C(d)$	d	$T_D(d)$	Ingesti- on	Inhalation (M)				
93	Np	0,45	14610	0,45	36525					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
94	Pu	0,45	14610	0,45	36525					0,0005	0,0005	0,8	0,81	6724	10% über sofortige Ausscheidung
95	Am	0,45	14610	0,45	36525					0,0005	0,0005	0,8	0,81	6724	10% über sofortige Ausscheidung
96	Cm	0,45	14610	0,45	36525					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
97	Bk	0,65	18250	0,25	7300					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
98	Cf	0,65	18250	0,25	7300					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
99	Es	0,65	18250	0,25	7300					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
100	Fm	0,65	18250	0,25	7300					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung
101	Md	0,65	18250	0,25	7300					0,0005	0,0005				10% über sofortige Ausscheidung

2.6 Unsicherheiten der Modellansätze

Die Abschätzung der Dosiskonversionskoeffizienten für Referenzorganismen ist mit Unsicherheiten verbunden, auf die hier im Zusammenhang eingegangen wird. Eine systematische und quantifizierende Untersuchung der Unsicherheiten bei der Ableitung von Dosiskonversionskoeffizienten für Referenzorganismen ist bisher nicht erfolgt und war auch im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich. Daher werden Unsicherheiten nachfolgend im Wesentlichen qualitativ beschrieben.

- Unsicherheiten der dosimetrischen Modelle

- bei äußerer Strahlenexposition:

In allen Modellen werden Näherungen bei der Beschreibung der Körperformen und deren Zusammensetzung gemacht. Körper werden als Ellipsoide beschrieben, indem die entsprechenden Achsenlängen festgelegt werden. Es wird von einem homogen absorbierenden Material im Körper ausgegangen. Eine Unterscheidung verschiedener Gewebe im Innern erfolgt nicht.

Im Vergleich zur Dosimetrie des Menschen sind die Annahmen extrem vereinfachend. Beim Menschen existieren für die Abschätzung bei äußerer Bestrahlung Phantome, die Körperform und –zusammensetzung möglichst realistisch (bezogen auf die Referenzperson) abbilden.

Für die Ermittlung von Energiedosen der Gesamtorganismen ist das Vorgehen als angemessen anzusehen, da eine weitere Spezifizierung der Exposition einzelner Körperteile dann nicht erforderlich ist. Die Referenzorganismen sollen zudem ein breites Feld von verschiedenen Spezies abdecken. Aus diesem Grund wäre eine genauere Modellierung nicht zielführend, da eine Übertragbarkeit – innerhalb akzeptierter großer Unsicherheiten – nicht mehr gegeben wäre.

- bei Aufnahme von Radionukliden in den Körper:

Die Annahmen zur Verteilung und zum Metabolismus von Radionukliden, die von den Referenzorganismen aufgenommen worden sind, sind stark vereinfachend. Entsprechende detaillierte Erkenntnisse liegen aber bislang auch nicht vor. Konzentrationsfaktoren von chemischen Elementen werden für sehr variable Bedingungen gewonnen, die alle Unsicherheiten beinhalten, die für ökologische Modelle typisch sind. Zwischen unterschiedlichen chemischen Verbindungen der Elemente, die sich auf die Konzentrationsfaktoren stark auswirken können, wird nicht unterschieden.

Bei der Dosimetrie des Menschen bestehen in dieser Hinsicht ebenfalls deutliche Unsicherheiten bei vielen Elementen. Aus Untersuchungen zur Strahlenexposition des Menschen ist bekannt, dass es bei einigen Elementen deutliche individuelle Unterschiede gibt, bei anderen (bei solchen, die eher homogen im Körper verteilt werden, z. B. Tritium oder Cäsium) eher ge-

ringe. Bei den Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion beim Menschen werden in vielen Fällen Gruppen chemischer Verbindungen unterschieden. Die Dosiskoeffizienten unterscheiden sich jeweils in der Regel um eine bis zwei Größenordnungen.

Auch wenn bei Flora und Fauna die Exposition verschiedener Organe nicht betrachtet wird, sind die ermittelten Energiedosen der Gesamtorganismen dennoch mit großen Unsicherheiten behaftet, da das Retentionsverhalten der Radionuklide in der Regel je nach chemischer Verbindung stark variiert. Auf dem derzeitigen Stand des Wissens stellen die hier abgeleiteten DCC aber den besten Stand dar, da für Säugetiere ein erster Ansatz zur Modellierung der Exposition durch Inhalation eingeführt wurde.

- Unsicherheiten der Expositionsszenarien

Die Unsicherheiten, die sich aus den Expositionsszenarien ergeben, sind von eher untergeordneter Bedeutung, da im Rahmen des Vorhabens nicht die tatsächliche Exposition von Referenzorganismen aufgrund einer Ableitung radioaktiver Stoffe in die Umwelt untersucht werden sollte, sondern das Verhältnis von Exposition der Referenzorganismen und Exposition der Referenzpersonen der Strahlenschutzverordnung maßgeblich war. Bei Gewährleistung des Strahlenschutzes des Menschen sind bestimmte Kontaminationen von Luft, Boden und Wasser mit Radionukliden zulässig, denen die Referenzorganismen ausgesetzt sind. Zur Ermittlung dieser zulässigen Kontaminationen mussten Szenarien definiert werden, die nicht abdeckend für alle denkbaren (und nach Strahlenschutzrecht zulässigen) Situationen sind, insbesondere bezogen auf die atmosphärische Ausbreitung mit einer Vorgabe der Emissionshöhe.

Die Expositionsszenarien können als typische Szenarien angesehen werden, wie sie zur Herleitung generischer Werte (z. B. Werte der maximal zulässigen Aktivitätskonzentration aus Strahlenschutzbereichen nach Anlage VII Teil D StrlSchV) üblich sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass hier beste Schätzer für DCC der Referenzorganismen (entsprechend dem derzeitigen Stand der Wissenschaft), unter Verwendung bester Schätzer der verfügbaren – nicht spezifisch für chemische Verbindungen vorliegenden - Konzentrationsfaktoren der Elemente herangezogen wurden. Große Unsicherheiten von Ausbreitung und Transfer abgeleiteter Radionuklide in der Umwelt werden durch den Bezug auf die Strahlenexposition der Referenzpersonen der Strahlenschutzverordnung deutlich reduziert.

2.7 Ermittelte Dosiskonversionskoeffizienten für die Referenzorganismen

Die für die Referenzorganismen berechneten Dosiskonversionskoeffizienten sind in Anhang 1 aufgelistet. Sie umfassen:

- **Terrestrische Organismen**

- Regenwurm
interne Exposition
externe Exposition
- Assel/Laus
interne Exposition
externe Exposition (auf dem Boden/im Boden)
Submersion
- Schnecke
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
- Amphibie
interne Exposition
externe Exposition (auf dem Boden/im Boden)
Submersion
- Reptil
interne Exposition
externe Exposition (auf dem Boden/im Boden)
Submersion
- Hummel/Biene
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
- Flechte/Moos
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
- Wildgras
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
- Strauch⁵
externe Exposition

⁵ Der Strauch wird in den Projekten FASSET und ERICA homogene Schicht auf kontaminiertem Boden modelliert. Das hier entwickelte Modell zur Abschätzung der Submersionsdosis ist darauf nicht anwendbar.

- Baum
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
- Ente
interne Exposition
externe Exposition
Submersion (bezogen auf Bodenkontamination/Luftkontamination)
- Entenei
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
- Ratte
interne Exposition
externe Exposition (im Boden/auf dem Boden)
Submersion
Inhalation
- Hirsch
interne Exposition
externe Exposition
Submersion
Inhalation

• **Limnische Organismen**

- Phytoplankton
interne Exposition
externe Exposition
- Gefäßpflanze
interne Exposition
externe Exposition
- Zooplankton
interne Exposition
externe Exposition
- Libellenlarve
interne Exposition
externe Exposition
- Schnecke
interne Exposition
externe Exposition
- Muschel
interne Exposition
externe Exposition
- Krebs
interne Exposition
externe Exposition

- bentischer Fisch
interne Exposition
externe Exposition
 - Forelle
interne Exposition
externe Exposition
 - Vogel
interne Exposition
externe Exposition
 - Bisamratte
interne Exposition
externe Exposition
 - Amphibie
interne Exposition
externe Exposition
- **Marine Organismen**
- Phytoplankton
interne Exposition
externe Exposition
 - Makroalge
interne Exposition
externe Exposition
 - Gefäßpflanze
interne Exposition
externe Exposition
 - Zooplankton
interne Exposition
externe Exposition
 - Wattwurm
interne Exposition
externe Exposition
 - Schnecke
interne Exposition
externe Exposition
 - Krebs
interne Exposition
externe Exposition
 - Scholle
interne Exposition
externe Exposition
 - pelagischer Fisch
interne Exposition
externe Exposition

- Seevogel
interne Exposition
externe Exposition
- Schweinswal
interne Exposition
externe Exposition
- Meeresschildkröte
interne Exposition
externe Exposition
- Seeanemone
interne Exposition
externe Exposition

Die Dosiskonversionskoeffizienten wurden mit folgenden Strahlungswichtungsfaktoren ermittelt:

- Alpha-Strahlung: 10,
- niederenergetische Beta-Strahlung: 3, und
- hochenergetische Beta-Strahlung sowie Gamma-Strahlung: 1.

3 Ermittlung der im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal zulässigen Kontamination von Luft, Boden und Wasser

Die Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/ legt in § 47 Abs. 1 StrlSchV Grenzwerte der effektiven Dosis und der Organdosen für Referenzpersonen fest, die bei Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Anlagen und Einrichtungen über Fortluft und Abwasser einzuhalten sind. Es ist dabei davon auszugehen, dass sich die Referenzpersonen außerhalb des Anlagengeländes dauerhaft an ungünstigsten Einwirkungsstellen aufhalten und von ungünstigsten Einwirkungsstellen vollständig ihre Lebensmittel beziehen. Bei der Dosisermittlung zu treffende Annahmen sind teils in Anlage VII StrlSchV aufgeführt (Expositionspfade, Verzehrsmengen, Atemraten und Aufenthaltszeiten). Das gesamte Berechnungsverfahren ist im Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV /AVV 2005/ festgelegt. Es wird hier auf diesen Entwurf Bezug genommen, da nur dieser die Berücksichtigung aller seit 2001 in der Strahlenschutzverordnung enthaltenen Referenzpersonen erlaubt. Im Übrigen wird dieser Entwurf in aktuellen Genehmigungsverfahren angewandt.

Durch die Festlegung der Dosisgrenzwerte und des Berechnungsverfahrens, mit dem deren Einhaltung zu überprüfen ist, werden Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser indirekt begrenzt. Wenn unterstellt wird, dass die Dosisgrenzwerte für die Referenzpersonen gerade ausgeschöpft werden, so lassen sich maximal zulässige Ableitungen errechnen. Über diese können maximale Kontaminationen in Umweltmedien bestimmt werden, über die wiederum Strahlenexpositionen von Referenzbiota berechnet werden können.

3.1 Berechnung der Dosis für den Menschen durch Ableitungen radioaktiver Stoffe

3.1.1 Ableitungen mit der Fortluft

Für die hier zu bearbeitende Fragestellung ist eine Berechnung der Dosis für den Menschen notwendig, bei der dieser im Verhältnis zur Kontamination von Umweltmedien einer möglichst geringen Strahlenexposition ausgesetzt ist. Auf diese Weise können maximale Kontaminationen von Umweltmedien ermittelt werden, die unter Einhaltung der Dosisgrenzwerte für den Menschen möglich wären. Allerdings bestehen zwischen der Dosis für den Menschen und der Kontamination von Umweltmedien direkte Korrelationen. Für die einzelnen bei Ableitungen mit der Fortluft relevanten Expositionspfade äußert sich das wie folgt:

- Die Dosis durch **Beta-Submersion** (äußere Exposition durch Beta-Strahlung beim Aufenthalt in der radioaktiven Wolke) hängt unmittelbar von der Konzentration radioaktiver Stoffe am Aufenthaltsort der Referenzperson (also an der

ungünstigsten Einwirkungsstelle, dem Ort mit der höchsten Kontamination der Luft) ab. Die **Kontamination der Luft**⁶ ist daher mit der Höhe der Dosis durch Beta-Submersion korreliert. Eine geringere Dosis für den Menschen bedeutet eine im gleichen Verhältnis reduzierte Kontamination der bodennahen Luft und umgekehrt.

Bei Radionukliden, die keine Beta-Strahlung aussenden, besteht hinsichtlich des Expositionspfads Beta-Submersion keine Begrenzung der Kontamination der Luft.

- Die Dosis durch **Gamma-Submersion** (äußere Exposition durch Gamma-Strahlung beim Aufenthalt in oder in der Nähe der radioaktiven Wolke) hängt ebenfalls unmittelbar von der Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft in der Nähe des Aufenthaltsorts der Referenzperson (also an der ungünstigsten Einwirkungsstelle) ab. Die **Kontamination der Luft** ist daher mit der Höhe der Dosis durch Gamma-Submersion korreliert. Ein linearer Zusammenhang wie bei der Beta-Submersion besteht aber nicht, da wegen der größeren Reichweite der Gamma-Strahlung nicht nur die Kontamination der bodennahen Luft an der Einwirkungsstelle zur Strahlenexposition des Menschen beiträgt.

Bei Radionukliden, die keine Gamma-Strahlung aussenden, besteht hinsichtlich des Expositionspfads Gamma-Submersion keine Begrenzung der Kontamination der Luft.

- Die Dosis durch **Gamma-Bodenstrahlung** (äußere Exposition beim Aufenthalt auf durch Fallout und Washout kontaminierten Flächen) hängt von der Ablagerung radioaktiver Stoffe auf dem Boden ab. Die Dosis durch Gamma-Bodenstrahlung nimmt dabei linear mit der **Kontamination des Bodens** zu.

Bei Radionukliden, die keine Gamma-Strahlung aussenden, besteht hinsichtlich des Expositionspfads Gamma-Bodenstrahlung keine Begrenzung der Kontamination des Bodens.

- Die Dosis durch **Inhalation** (innere Exposition durch Einatmen radioaktiver Stoffe beim Aufenthalt in der radioaktiven Wolke) ist unmittelbar an die **Kontamination der Luft** gekoppelt. Eine geringere Dosis für den Menschen bedeutet eine im gleichen Verhältnis reduzierte Kontamination der bodennahen Luft.
- Die Dosis durch **Ingestion** (innere Exposition durch Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel einschließlich Muttermilch) hängt für alle Radionuklide außer H-3 und C-14 linear von der **Kontamination des Bodens** ab, da diese anteilig zur direkten Kontamination von Pflanzenoberflächen und über den Wurzeltransfer zur **Kontamination von Pflanzen** führt. Die Ingestion von Milch

⁶ Es handelt sich hier um – im Sinne der Exposition der Referenzpersonen - bodennahe Luft, also um die Luft, in der sich diese Personen aufhalten. Die Kontamination in höheren Luftschichten – konservativ in Freisetzungshöhe über Grund – lässt sich mit dem Ausbreitungsmodell der AVV zu § 47 StrlSchV zusätzlich berechnen.

und Fleisch ist ebenfalls daran gekoppelt, da die Kontamination von Milch und Fleisch vom Konsum kontaminierten Weidegrases abhängig ist. H-3 und C-14 werden direkt aus der Luft in die Pflanzen aufgenommen, so dass für diese Radionuklide eine direkte Koppelung an die **Kontamination der Luft** an der ungünstigsten Einwirkungsstelle gegeben ist.

Um eine realistische Bandbreite der Verhältnisse von Strahlenexposition des Menschen und der Kontamination der Umweltmedien zu erfassen, wird zum Einen von einer relativ niedrigen Freisetzungshöhe über Grund ausgegangen (20 m), bei der in 100 m Entfernung nach /AVV 2005, Anhang 8 Abb. 1/, der höchste Langzeitausbreitungsfaktor und damit die höchste Kontamination der bodennahen Luft auftritt. Auch die Kontamination des Bodens und von Bodenbewuchs ist dann dort am höchsten. Ebenfalls ermittelt wird die Kontamination der Luft in einer Höhe von 20 m über Grund, da Habitate der Referenzorganismen sich auch in einer solchen Höhe befinden können (z. B. Vogelnester, Baumkronen als Lebensraum, Steilwände).

Bei einer niedrigeren Freisetzungshöhe können sich auch höhere Kontaminationen der bodennahen Luft und des Bodens ergeben, eine Höhe von 20 m ist aber als erforderlich anzusehen, um Kontaminationen hervorrufen zu können, die sich über einen nicht zu kleinräumigen Bereich erstrecken. Relevante Strahlenexpositionen von Flora und Fauna sind aber nur dann möglich, wenn sie nicht lokal zu begrenzt sind, da der Schutz einer Population im Vordergrund steht.

Zusätzlich wird eine Freisetzungshöhe von 200 m über Grund betrachtet und dabei sowohl die bodennahe Luftkontamination als auch die Luftkontamination in 200 m Höhe über Grund ermittelt.

Nach /AVV 2005/ ist die Strahlenexposition durch äußere Exposition und Inhalation an der für diese Expositionspfade ungünstigsten Einwirkungsstelle zu ermitteln. Die Strahlenexposition durch Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel ist hinzu zu zählen, wobei die Nahrungsmittel von der Einwirkungsstelle stammen, an der sich deren maximale Kontamination ergibt. Es werden daher unterschiedliche Aufpunkte für die genannten Gruppen von Expositionspfaden betrachtet und die jeweils ungünstigste Kombination ausgewählt. Bei deutlichen Dosisbeiträgen durch Washout-bedingte Ablagerung von Radionukliden ist zusätzlich ein näherer Aufpunkt zu betrachten, als er sich für das Konzentrationsmaximum der bodennahen Luft ergibt. Dabei wird hier von einem Abstand von 50 m vom Emissionsort ausgegangen.

Eine Variation von jährlichen Niederschlagsmengen und Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung oder anderen möglichen Parametern ist nicht erforderlich. Jede Variation, die zu einer höheren Kontamination der Umweltmedien führt, führt zu einer linear damit ansteigenden Strahlenexposition der Referenzpersonen. Die bei Einhaltung der Dosisgrenzwerte noch erlaubte Kontamination ist daher stets gleich.

Im Einzelnen werden folgende Parameterwerte verwendet, soweit sie sich nicht unmittelbar aus /AVV 2005/ ergeben:

- Für die **Freisetzungshöhe über Grund** werden zwei Werte angesetzt:
 - 20 m (Szenario 1) und
 - 200 m (Szenario 2).
- Die betrachteten **Einwirkungsstellen** (Abstand vom Emissionsort) für diese beiden Szenarien sind:
 - Szenario 1: 50 m und 100 m (Berechnung der Strahlenexposition der Referenzpersonen) sowie 100 m (Berechnung der Umweltkontamination im Hinblick auf den Schutz von Flora und Fauna⁷),
 - Szenario 2: 50 m und 500 m (Berechnung der Strahlenexposition der Referenzpersonen) sowie 500 m (Berechnung der Umweltkontamination im Hinblick auf den Schutz von Flora und Fauna).
- Der **Langzeitausbreitungsfaktor** für die Windrichtungshäufigkeit 100%⁸ beträgt:
 - Szenario 1: $6,5 \cdot 10^{-5}$ s/m³ am Aufpunkt 100 m und $1,0 \cdot 10^{-5}$ s/m³ am Aufpunkt 50 m,
 - Szenario 2: $6,0 \cdot 10^{-7}$ s/m³ am Aufpunkt 500 m (am Aufpunkt 50 m ist der Langzeitausbreitungsfaktor vernachlässigbar).

Als Windrichtungshäufigkeit für den 30°-Sektor mit der größten Windrichtungshäufigkeit werden 20% angesetzt⁹. Dort wo der Langzeitausbreitungsfaktor für das Sommerhalbjahr benötigt wird, wird dieser mit dem doppelten Wert des Langzeitausbreitungsfaktors für das Gesamtjahr angesetzt, entsprechend dem vereinfachten Verfahren gemäß Kapitel 4.1.4 der AVV zu § 47 StrlSchV.

- Der **Langzeitausbreitungsfaktor für Gamma-Submersion** für die Windrichtungshäufigkeit 20%¹⁰ beträgt bezogen auf 1 MeV Gamma-Energie:
 - Szenario 1: $1,0 \cdot 10^{-3}$ s/m² (Aufpunkt 100 m) und $1,3 \cdot 10^{-3}$ s/m² (Aufpunkt 50 m),
 - Szenario 2: $2,0 \cdot 10^{-5}$ s/m² (Aufpunkt 500 m) und $4,0 \cdot 10^{-5}$ s/m² (Aufpunkt 50 m).

Die nuklidspezifische Berechnung mit der vereinfachten Gleichung (3.5) nach /AVV 2005/ vorgenommen.

⁷ Es wird ein Mindestabstand angesetzt, um zu kleinräumige Kontaminationen auszuklammern.

⁸ Ermittelt nach Anhang 8 Abb. 1 der AVV zu § 47 StrlSchV (Diagramm zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors).

⁹ Entspricht beispielsweise den Verhältnissen am Standort des Forschungszentrums Jülich im langjährigen Mittel.

¹⁰ Ermittelt nach Anhang 10 Abb. 1 der AVV zu § 47 StrlSchV (Diagramm zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gamma-Submersion).

- Der **Langzeitfalloutfaktor** hängt vom Langzeitausbreitungsfaktor und der Ablagerungsgeschwindigkeit ab. Er beträgt für das Gesamtjahr, ermittelt mit dem vereinfachten Verfahren nach Kapitel 4.2.1.2 der AVV zu § 47 StrlSchV:
 - Szenario 1:
 - elementares Iod: $2,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m),
 - organisch gebundenes Iod: $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m),
 - Schwebstoffe: $3,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,95 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m).
 - Szenario 2:
 - elementares Iod: 0 m^{-2} (Aufpunkt 50 m) und $1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m),
 - organisch gebundenes Iod: 0 m^{-2} (Aufpunkt 50 m) und $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m),
 - Schwebstoffe: 0 m^{-2} (Aufpunkt 50 m) und $1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m).

Für das Sommerhalbjahr werden entsprechend /AVV 2005/ die doppelten Werte des Langzeitfalloutfaktors für das Gesamtjahr angesetzt.

- Die vereinfachte Berechnung des Langzeitwashoutfaktors für das Gesamtjahr und das Sommerhalbjahr erfolgt nach Gleichung (4.17) in /AVV 2005/. Es werden die folgenden Werte des **Langzeitwashoutfaktors für das Gesamtjahr**¹¹:
 - Szenario 1:
 - elementares Iod und Schwebstoffe: $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m),
 - organisch gebundenes Iod: $3,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m),
 - tritiiertes Wasser: $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m).

¹¹ Zur Berechnung nach Gleichung (4.17) der AVV zu § 47 StrlSchV wurden vor allem Daten aus /HMWT 1980/ herangezogen. Es liegen mittlere Niederschlagsmengen von 180 mm im Gesamtjahr und 130 mm im Sommerhalbjahr (für einen 30°-Sektor) zugrunde sowie eine mittlere Windgeschwindigkeit in Freisetzungshöhe von 1,2 m/s (Szenario 1) bzw. 2,3 m/s (Szenario 2).

- Szenario 2:
 - elementares Iod und Schwebstoffe: $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m),
 - organisch gebundenes Iod: $1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m),
 - tritiiertes Wasser: $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m).

Für das **Sommerhalbjahr** werden die folgenden Werte angesetzt:

- Szenario 1:
 - elementares Iod und Schwebstoffe: $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m),
 - organisch gebundenes Iod: $5,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m),
 - tritiiertes Wasser: $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 100 m).
- Szenario 2:
 - elementares Iod und Schwebstoffe: $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m),
 - organisch gebundenes Iod: $2,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $2,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m),
 - tritiiertes Wasser: $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 50 m) und $1,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}$ (Aufpunkt 500 m).
- Die **Abreicherung** der radioaktiven Wolke durch Fallout und Washout wird vernachlässigt, da sie im zu betrachtenden Entfernungsbereich von bis zu 500 m nicht relevant ist. Der radioaktive Zerfall während der Transportzeit ist dagegen zu berücksichtigen, da auch Radionuklide mit sehr kurzen Halbwertszeiten (z. B. im Bereich von Minuten) einbezogen sind.

Die übrigen zur Berechnung der Strahlenexposition der Referenzpersonen notwendigen Parameterwerte sind in der AVV zu § 47 StrlSchV vorgegeben. Allerdings sind einige Faktoren nicht für alle Elemente genannt. Bei den **Transferfaktoren** (Boden-Weidegras, Boden-Pflanzen, Weide-Milch, Weide-Fleisch sowie Transfer in die Muttermilch) fehlen – von Gasen abgesehen – die Elemente Li, B, Ti, Fr, Es, Fm, Md, No und Lr. Da verschiedene dieser Elemente nur Radionuklide mit extrem kurzen Halbwertszeiten aufweisen, sind auch nicht von allen Elementen Radionuklide in Anlage VII Tabelle 4 StrlSchV enthalten. Zu ergänzen sind aber Transferfaktoren für die Elemente Ti, Fr, Es, Fm und Md, von denen Radionuklide in Anlage VII Tabelle 4 StrlSchV aufgeführt sind. In diesen Fällen erfolgt die Zuordnung nach der Ähnlichkeit chemischen Verhaltens. Für die Aktinidenelemente Es, Fm und Md werden die gleichen Transferfaktoren festgelegt wie in der AVV zu § 47 StrlSchV für die Aktinidenelemente Bk und Cf. Ti zählt zu den Übergangsmetallen; es werden die

Transferfaktoren für Zr herangezogen. Fr ist ein Alkalimetall und es werden die Transferfaktoren für Rb den Berechnungen zugrunde gelegt.

Im Detail sind die entsprechend gewählten Werte in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Ergänzte Transferfaktoren Boden-Weidegras, Boden-Pflanzen, Weide-Milch, Weide-Fleisch, Ingestion-Muttermilch und Inhalation-Muttermilch

Element	Transferfaktor					
	Boden-Weidegras	Boden-Pflanzen	Weide-Milch	Weide-Fleisch	Ingestion-Muttermilch	Inhalation-Muttermilch
	$\frac{\text{Bq/kg FM}}{\text{Bq/kg TM}}$	$\frac{\text{Bq/kg FM}}{\text{Bq/kg TM}}$	d/kg Milch	d/kg Fleisch	d/kg Muttermilch	d/kg Muttermilch
Ti	0,001	0,003	0,000005	0,02	0,07	0,3
Fr	0,9	0,09	0,006	0,01	0,4	0,1
Es	0,003	0,003	0,00002	0,0002	0,0006	0,1
Fm	0,003	0,003	0,00002	0,0002	0,0006	0,1
Md	0,003	0,003	0,00002	0,0002	0,0006	0,1

Des Weiteren waren die Verweilkonstanten aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten für Weide und Ackerboden für die meisten Elemente zu ergänzen. Dies erfolgt auf der Basis der in Anhang 4 der AVV zu § 47 StrlSchV angegebenen Möglichkeit, die nicht aufgeführten Elemente der Gruppe der Aktiniden zuzuordnen.

3.1.2 Ableitungen mit dem Abwasser in ein Fließgewässer

Bei Ableitungen mit Abwasser stellen sich die Verhältnisse zwischen der Dosis für den Menschen und der Kontamination von Umweltmedien für die relevanten Expositionspfade wie folgt dar:

- Die Dosis durch **Trinkwasserkonsum** hängt linear von der **Kontamination des Wassers** ab. Eine geringere Dosis für den Menschen bedeutet daher eine im gleichen Verhältnis reduzierte Kontamination des Wassers.
- Die Dosis über den Pfad **Beregnung** und anschließender Ingestion kontaminierter Lebensmittel hängt ebenfalls linear von der **Kontamination des Wassers** ab. Eine geringere Dosis für den Menschen bedeutet daher auch hier eine im gleichen Verhältnis reduzierte Kontamination des Wassers.
- Die Dosis über **Fischverzehr** hängt ebenfalls linear von der **Kontamination des Wassers** ab. Eine geringere Dosis für den Menschen bedeutet daher auch hier eine im gleichen Verhältnis reduzierte Kontamination des Wassers.
- Die Dosis durch **Aufenthalt auf Ufersediment** hängt linear von der **Kontamination des Ufersediments** ab. Eine geringere Dosis für den Menschen bedeutet daher auch hier eine im gleichen Verhältnis reduzierte Kontamination des Ufersediments. Allerdings ist im Hinblick auf die Exposition der Referenz-

biota auch für den Menschen nicht zugängliche **Kontamination von Sediment** innerhalb des Vorfluters relevant.

Für den Abwasserpfad ergeben sich die möglichen Kontaminationen von Umweltmedien daher direkt aus der im Hinblick auf den Schutz des Menschen notwendigen Begrenzung der Konzentration im Wasser des Vorfluters.

Beim Trinkwasserpfad kann nach /AVV 2005/ ortsspezifisch ein Abklingen des Wassers zwischen Entnahme aus dem Fließgewässer und der Einspeisung in das Trinkwassernetz berücksichtigt werden. In der Praxis ist dies bisher nicht üblich. Würde ein solches Abklingen berücksichtigt, so könnten bei kurzlebigen Radionukliden deutlich höhere Konzentrationen im Wasser und damit auch deutlich höhere Strahlenexpositionen von darin lebenden Tieren und Pflanzen zulässig sein.

Hinsichtlich des Fischverzehrs wird, wie in der Anwendung in Genehmigungsverfahren üblich, die gesamte Verzehrrate für Fisch nach /AVV 2005/ als Süßwasserfisch zugrunde gelegt. Im Mittel würde in Deutschland dieser Anteil nur etwa 17 % entsprechen, wäre aber ohnehin „regionalen Besonderheiten“ anzupassen.

Bei der Sedimentation ist zwischen dem Nahbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe ≤ 10 Stunden) und dem Fernbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe > 5 Tage) zu unterscheiden. Für die Ermittlung der Strahlenexposition des Menschen wird der Fall ausgewählt, der zur geringeren Exposition führt, um im Sinne der Aufgabenstellung dieses Vorhabens konservativ zu sein.

Die zur Berechnung der Strahlenexposition der Referenzpersonen über den Wasserpfad notwendigen Parameterwerte sind in der AVV zu § 47 StrlSchV nicht für alle Elemente vorgegeben. Zur Abdeckung aller Radionuklide der Anlage VII Tabelle 4 StrlSchV waren daher **Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch, Halbwertszeiten für die Anlagerung an Schwebstoffe und Übergangskonstanten von Wasser in Sediment** zu ergänzen. Die Zuordnung erfolgt entsprechend der Ähnlichkeit chemischen Verhaltens. Für Süßwasserfisch wurden noch ergänzende Daten aus /IAEA 2010, Tabelle 57/ herangezogen. Im Detail sind die entsprechend gewählten Werte in Tabelle 3-2 bzw. ihre Zuordnung zu den Elementgruppen nach Anhang 14 Tabellen 1 und 2 der AVV zu § 47 StrlSchV in Tabelle 3-3 zusammengestellt.

Tabelle 3-2: Ergänzte Konzentrationsfaktoren für Süßwasserfisch (in Bq/kg Frischgewicht pro Bq/l)

Element	Konzentrationsfaktor in Fischfleisch	abgeleitet aus dem Element bzw. Quelle
Be	200	Ba
F	50	I
Mg	110	IAEA 2010
Al	66	IAEA 2010
Si	95	Cl
S	2.000	Ph
Cl	95	IAEA 2010
K	4.000	IAEA 2010
Ca	1.000	IAEA 2010
Sc	930	IAEA 2010
Ti	370	IAEA 2010
V	290	IAEA 2010
Ga	10.000	Tl
Ge	3.000	Sn
As	390	IAEA 2010
Br	160	IAEA 2010
Y	31	IAEA 2010
Mo	27	IAEA 2010
Rh	750	Pt
Pd	750	Pt
In	10.000	Tl
Te	420	IAEA 2010
Pr	750	Tb
Nd	750	Tb
Sm	750	Tb
Eu	150	IAEA 2010
Gd	750	Tb
Tb	750	IAEA 2010
Dy	300	IAEA 2010
Ho	750	Tb
Er	750	Tb
Tm	750	Tb
Yb	750	Tb
Lu	750	Tb
Hf	2100	IAEA 2010
Ta	200	Nb
W	750	Tb
Re	80	Tc
Os	750	Tb
Ir	750	Tb
Pt	750	Tb
At	50	I
Fr	2.000	Rb
Ac	25	Am
Pa	25	Am
Bk	25	Am
Cf	25	Am
Es	25	Am
Fm	25	Am
Md	25	Am

Tabelle 3-3: Zuordnung von Elementen zu den drei Elementgruppen der AVV zu § 47 StrlSchV zur Berechnungen der Sedimentation in Fließgewässern

Element- gruppe	Elemente nach AVV zu § 47 StrlSchV	zugeordnete Elemente
1	Sr, Tc, Nb, Te, Sb, Ag, Ra	Be, P, S, Ca, V, Cu, As, Se, Ba, Ta, Au, Bi, Po
2	Zn, Y, I, Cs, La	Li, F, Na, Mg, Cl, K, Sc, Zn, Br, Rb, Y, Cd, Hg, At, Fr
3	Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr, Ru, Re, Aktiniden	C, Al, Si, Ti, Ga, Ge, Mo, Rd, Pd, In, Sn, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Os, Ir, Pt, Tl, Pb, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md

3.1.3 Ableitungen mit dem Abwasser ins Meer

Da in Deutschland keine kerntechnischen Anlagen radioaktive Abwässer direkt ins Meer einleiten, gibt es in /AVV 2005/ keine Modellierung für eine solche Situation. Dennoch soll überprüft werden, ob auch in einem solchen zukünftig möglichen Fall der Schutz des Menschen bereits den Schutz von Flora und Fauna abdeckt. Bei Ableitungen in marine Gewässer sind andere Konzentrationsfaktoren für darin befindliche Organismen anzuwenden als nach /AVV 2005/, da diese von der stofflichen Zusammensetzung des Wassers abhängig sind. Außerdem ist bei der Ermittlung der Strahlenexposition des Menschen der Verzehr von marinen Produkten (neben Fisch auch Schalentieren und Tang) zu berücksichtigen.

Zusammenstellungen von **Konzentrationsfaktoren** zur Beschreibung des Übergangs aus dem Meereswasser für Meeresfisch und Krebstiere finden sich in /IAEA 2001/ sowie für Meeresfisch, Krebstiere, Weichtiere und Algen in /IAEA 2004/. Umfangreichere Untersuchungen zu solchen Konzentrationsfaktoren wurden ebenfalls für radioökologische Untersuchungen in der Region Nord Cotentin in Zusammenhang mit Emissionen der französischen Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague vorgenommen /GRNC 1999/. Die hier verwendeten Daten sind in Tabelle 3-4 zusammengestellt. Primär wurden die in /IAEA 2004/ empfohlenen Daten (dort Tabelle III bis VI) übernommen. Für die Elemente P, Cu, Ga, As, Br, Rb, Mo, Rh wurden die Daten aus /IAEA 2001/ (für Fisch und Schalentiere) übernommen, da zu diesen Elementen in /IAEA 2004/ keine Werte enthalten sind. Ebenfalls ergänzt wurden Daten zu Krebstieren, Weichtieren und Algen für das Element Mo aus /GRNC 1999/. Die verbleibenden Lücken wurden geschlossen, indem Werte entsprechend der Ähnlichkeit chemischen Verhaltens angesetzt wurden.

Tabelle 3-4: Konzentrationsfaktoren für marine Nahrungsmittel (in Bq/kg Frischgewicht pro Bq/l)

Element	Fisch	Krebstiere	Weichtiere	Algen
H	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)
Be	10 (Ba)	0,7 (Ba)	10 (Ba)	70 (Ba)
C	20.000 (1)	20.000 (1)	20.000 (1)	10.000 (1)
F	9 (I)	3 (I)	10 (I)	10.000 (I)
Na	1 (1)	0,07 (1)	0,3 (1)	0,5 (1)
Mg	2 (Ca)	5 (Ca)	3 (Ca)	6 (Ca)
Al	700 (Ga)	700 (Ga)	6.000 (Ga)	1.000 (Ga)
Si	0,06 (Cl)	0,06 (Cl)	0,05 (Cl)	0,05 (Cl)
P	30.000 (2)	20.000 (2)	300 (Sb)	20 (Sb)
S	1 (1)	1 (1)	3 (1)	3 (1)
Cl	0,06 (1)	0,06 (1)	0,05 (1)	0,05 (1)
K	1 (Na)	0,07 (Na)	0,3 (Na)	0,5 (Na)
Ca	2 (1)	5 (1)	3 (1)	6 (1)
Sc	1.000 (1)	300 (1)	1.000 (1)	90.000 (1)
Ti	20 (Zr)	200 (Zr)	5.000 (Zr)	3.000 (Zr)
V	10 (Mo)	100 (Mo)	100 (Mo)	100 (Mo)
Cr	200 (1)	100 (1)	2.000 (1)	6.000 (1)
Mn	1.000 (1)	5.000 (1)	50.000 (1)	6.000 (1)
Fe	30.000 (1)	500.000 (1)	500.000 (1)	20.000 (1)
Co	700 (1)	7.000 (1)	20.000 (1)	6.000 (1)
Ni	1.000 (1)	1.000 (1)	2.000 (1)	2.000 (1)
Cu	700 (2)	2.000 (2)	60.000 (Ag)	5.000 (Ag)
Zn	1.000 (1)	300.000 (1)	80.000 (1)	2.000 (1)
Ga	700 (2)	700 (2)	6.000 (Tl)	1.000 (Tl)
Ge	500.000 (Sn)	500.000 (Sn)	500.000 (Sn)	200.000 (Sn)
As	1.000 (2)	2.000 (2)	300 (Sb)	2.000 (Sb)
Se	10.000 (1)	10.000 (1)	9.000 (1)	2.000 (1)
Br	3 (2)	10 (2)	10 (I)	10.000 (I)
Rb	100 (2)	20 (2)	60 (Cs)	50 (Cs)
Sr	3 (1)	5 (1)	10 (1)	10 (1)
Y	20 (1)	1.000 (1)	1.000 (1)	1.000 (1)
Zr	20 (1)	200 (1)	5.000 (1)	3.000 (1)
Nb	30 (1)	200 (1)	1.000 (1)	3.000 (1)
Mo	10 (2)	100 (2)	100 (3)	100 (3)
Tc	80 (1)	1.000 (1)	500 (1)	30.000 (1)
Ru	2 (1)	100 (1)	500 (1)	2.000 (1)
Rh	100 (2)	1.000 (2)	500 (Pd)	2.000 (Pd)
Pd	300 (1)	300 (1)	300 (1)	1.000 (1)
Ag	10.000 (1)	200.000 (1)	60.000 (1)	5.000 (1)
Cd	5.000 (1)	80.000 (1)	80.000 (1)	20.000 (1)
In	500 (1)	10.000 (1)	10.000 (1)	5.000 (1)
Sn	500.000 (1)	500.000 (1)	500.000 (1)	200.000 (1)
Sb	600 (1)	300 (1)	300 (1)	20 (1)
Te	1.000 (1)	1.000 (1)	1.000 (1)	10.000 (1)
I	9 (1)	3 (1)	10 (1)	10.000 (1)
Cs	100 (1)	50 (1)	60 (1)	50 (1)
Ba	10 (1)	0,7 (1)	10 (1)	70 (1)
La	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Ce	50 (1)	1.000 (1)	2.000 (1)	5.000 (1)
Pr	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Nd	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Pm	300 (1)	2.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
Sm	300 (1)	4.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
Eu	300 (1)	4.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)

Fortsetzung Tabelle 3-4

Element	Fisch	Krebstiere	Weichtiere	Algen
Gd	300 (1)	4.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
Tb	60 (1)	4.000 (1)	3.000 (1)	2.000 (1)
Dy	300 (1)	4.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
Ho	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Er	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Tm	300 (1)	4.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
Yb	200 (1)	4.000 (1)	3.000 (1)	800 (1)
Lu	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Hf	500 (1)	4.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
Ta	60 (1)	2.000 (1)	7.000 (1)	3.000 (1)
W	90 (1)	10 (1)	600 (1)	600 (1)
Re	80 (Tc)	1.000 (Tc)	500 (Tc)	30.000 (Tc)
Os	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Ir	20 (1)	100 (1)	100 (1)	1.000 (1)
Pt	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Au	60 (Tb)	4.000 (Tb)	3.000 (Tb)	2.000 (Tb)
Hg	30.000 (1)	10.000 (1)	2.000 (1)	20.000 (1)
Tl	5.000 (1)	1.000 (1)	6.000 (1)	1.000 (1)
Pb	200 (1)	90.000 (1)	50.000 (1)	1.000 (1)
Bi	200 (Pb)	90.000 (Pb)	50.000 (Pb)	1.000 (Pb)
Po	2.000 (1)	20.000 (1)	20.000 (1)	1.000 (1)
At	9 (l)	3 (l)	10 (l)	10.000 (l)
Fr	100 (Rb)	20 (Rb)	60 (Rb)	50 (Rb)
Ra	100 (1)	100 (1)	100 (1)	100 (1)
Ac	50 (1)	1.000 (1)	1.000 (1)	1.000 (1)
Th	600 (1)	1.000 (1)	1.000 (1)	200 (1)
Pa	50 (1)	10 (1)	500 (1)	100 (1)
U	1 (1)	10 (1)	30 (1)	100 (1)
Np	1 (1)	100 (1)	400 (1)	50 (1)
Pu	100 (1)	200 (1)	3.000 (1)	4.000 (1)
Am	100 (1)	400 (1)	1.000 (1)	8.000 (1)
Cm	100 (1)	400 (1)	1.000 (1)	5.000 (1)
Bk	100 (1)	400 (1)	1.000 (1)	8.000 (1)
Cf	100 (1)	400 (1)	1.000 (1)	8.000 (1)
Es	100 (Cf)	400 (Cf)	1.000 (Cf)	8.000 (Cf)
Fm	100 (Cf)	400 (Cf)	1.000 (Cf)	8.000 (Cf)
Md	100 (Cf)	400 (Cf)	1.000 (Cf)	8.000 (Cf)

Herkunft der tabellierten Werte: (1) /IAEA 2004/
(2) /IAEA 2001/
(3) /GRNC 1999/

Chemisches Element bei Übertragung wegen Ähnlichkeit

Verzehrsraten mariner Nahrungsmittel sind für die zu berücksichtigenden Referenzpersonen in /AVV 2005/ nicht enthalten. In /NRPB 1995/ werden entsprechende Daten für eine „repräsentative kritische Gruppe“ vorgeschlagen, die in Tabelle 3-5 angegeben sind. Ebenfalls dort angegeben sind entsprechende Daten aus /IAEA 2001/. Nicht berücksichtigt wird in /NRPB 1995/ und /IAEA 2001/ der mögliche Verzehr von Algen, für die sich gemäß Tabelle 3-4 teils besonders hohe Konzentrationsfaktoren ergeben.

Tabelle 3-5: Verzehrswerten mariner Nahrungsmittel für Personen einer kritischen Gruppe nach /NRPB 1995/ und /IAEA 2001/ (in kg/a)

Lebensmittelgruppe	Personengruppe		
	Erwachsener	Kind	Kleinkind
/NRPB 1995/			
Fisch	100	60	25
Krebstiere	20	20	0
Weichtiere	15	0	0
/IAEA 2001/			
Fisch	50	Keine Angabe	25
Schalentiere	15	Keine Angabe	0

Die hier verwendeten Verzehrswerten mariner Nahrungsmittel für die Altersgruppen nach Strahlenschutzverordnung sind in Tabelle 3-6 analog der den Festlegungen der AVV zu § 47 StrlSchV zugrunde liegenden Philosophie angesetzt. Es wurde daher nicht auf deutsche Mittelwerte des Verzehrswerten von Meeresfisch zurückgegriffen, da nach der Philosophie der AVV zu § 47 StrlSchV das 95. Perzentil der Verzehrswerten eines Meeresanwohners angemessen wäre. Hinsichtlich der Höhe des Verzehrswerten von Algen ist zu berücksichtigen, dass sich die in Tabelle 3-6 aufgeführten Werte auf die Feuchtmasse beziehen. Ein Jahresverzehr von 1 kg Algen würde daher bei Konsum eines Trockenprodukts einer mittleren Verzehrswerten dieses Produkts von etwa einem halben Gramm pro Tag entsprechen, so dass die Werte der Tabelle 3-6 nicht als unrealistisch hoch anzusehen sind.

Tabelle 3-6: Hier verwendete Verzehrswerten mariner Nahrungsmittel für die Referenzpersonen der Strahlenschutzverordnung (in kg/a)

Lebensmittel	Verzehrswerten (in kg/a FM)					
	Altersgruppe (in Jahren)					
	≤ 1	> 1 - ≤ 2	> 2 - ≤ 7	> 7 - ≤ 12	> 12 - ≤ 17	> 17
Fisch	5	15	30	45	80	100
Krebstiere	0	0	10	15	18	20
Weichtiere	0	0	5	10	13	15
Algen	1	2	4	6	8	10

Die Konzentration von Radionukliden in marinen Lebensmitteln und die Strahlenexposition für die Referenzpersonen nach Strahlenschutzverordnung durch den Verzehr dieser marinen Lebensmittel wird – in weitestmöglicher Anlehnung an die AVV zu § 47 StrlSchV - wie folgt berechnet:

$$C_r^{mL} = C_r^{Meer} \cdot T_r^{mL} \quad (31)$$

für die Referenzpersonen mit Alter > 1 Jahr:

$$H_{T,g,r} = (U^{Fi} \cdot C_r^{Fi} + U^{Kr} \cdot C_r^{Kr} + U^{We} \cdot C_r^{We} + U^{Al} \cdot C_r^{Al}) \cdot g_{g,r,T} \quad (32)$$

für die Referenzperson mit Alter ≤ 1 Jahr (einschließlich Muttermilchverzehr):

$$H_{T,g,r} = (U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot C_r^{Fi} + U_{\leq 1a}^{Kr} \cdot C_r^{Kr} + U_{\leq 1a}^{We} \cdot C_r^{We} + U_{\leq 1a}^{Al} \cdot C_r^{Al} + \frac{1}{365 \cdot a_d} \cdot (U_{>17a}^{Fi} \cdot C_r^{Fi} + U_{>17a}^{Kr} \cdot C_r^{Kr} + U_{>17a}^{We} \cdot C_r^{We} + U_{>17a}^{Al} \cdot C_r^{Al}) \cdot T_r^{MM,g} \cdot U^{MM}) \cdot g_{g,r,T} \quad (33)$$

In diesen Formeln bedeuten:

- C_r^{mL} : spezifische Aktivität des Radionuklids r im marinen Lebensmittel mL in $Bq \cdot kg^{-1}$
- C_r^{Meer} : spezifische Aktivität des Radionuklids r im Meerwasser in $Bq \cdot l^{-1}$
- T_r^{mL} : Transferfaktor des Radionuklids r vom Meerwasser in das marine Lebensmittel mL in $Bq \cdot kg^{-1}$ Frischgewicht pro $Bq \cdot l^{-1}$
- $H_{T,g,r}$: Jahresdosis im Organ oder Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r der Referenzperson g in Sv
- $U^{Fi/Kr/We/Al}$: jährliche Verzehrsmenge an Fisch/Krebs/Weichtieren/Algen in kg
- $C_r^{Fi/Kr/We/Al}$: spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fisch/Krebs/Weichtieren/Algen in $Bq \cdot kg^{-1}$
- $g_{g,r,T}$: Dosiskoeffizient für das Organ oder Gewebe T durch Ingestion des Radionuklids r der Referenzperson g in $Sv \cdot Bq^{-1}$
- a_d : Zeitraum eines Tages; $a_d = 1$ d
- $T_r^{MM,g}$: Transferfaktor des Radionuklids r von Lebensmitteln in die Muttermilch in $d \cdot kg^{-1}$
- U^{MM} : jährliche Verzehrsmenge an Muttermilch in kg

Zu berücksichtigen ist bei Ableitungen radioaktiver Abwässer ins Meer auch die Kontamination des Sediments, die auch durch Aufenthalt auf Strandflächen zu einer Strahlenexposition der Referenzpersonen führen kann. In /IAEA 2004/ werden **Verteilungskoeffizienten** K_d angegeben, die das Verhältnis der Aktivität pro Trockenmasse Sediment zur volumenbezogenen Aktivität im Wasser darstellen (Bq/kg pro Bq/l). Die in /IAEA 2004/ empfohlenen Werte sind in Tabelle 3-7 zusammengestellt. Ebenfalls in dieser Tabelle enthalten sind die notwendigen Ergänzungen von Verteilungskoeffizienten für Elemente aufgrund der Ähnlichkeit des chemischen Verhal-

tens im entsprechenden Milieu. In der Literatur wird zwischen dem offenen Meer und der Küste unterschieden. Für die Berechnung der Strahlenexposition der Referenzpersonen werden nur die Daten der küstennahen Sedimentation benötigt, da diese für die Strahlenexposition beim Aufenthalt am Ufer relevant sind.

Tabelle 3-7: Verteilungskoeffizienten zwischen Sediment und Meerwasser nach /IAEA 2004/, ergänzt für dort nicht enthaltene Elemente entsprechend ähnlichem chemischen Verhalten im entsprechenden Milieu (in Bq/kg Trockenmasse pro Bq/l)

Element	Verteilungskoeffizient K_d		
	offenes Meer	Küste	abgeleitet aus dem Element bzw. Quelle
H	1	1	IAEA 2004
Be	9.000	2.000	Ba
C	2.000	1.000	IAEA 2004
F	200	70	I
Na	1	0,1	IAEA 2004
Mg	1	0,03	Cl
Al	9.000	2.000	Ba
Si	300.000	4.000.000	Sn
P	4.000	2.000	Sb
S	1	0,5	IAEA 2004
Cl	1	0,03	IAEA 2004
K	1	0,1	Na
Ca	500	500	IAEA 2004
Sc	7.000.000	5.000.000	IAEA 2004
Ti	7.000.000	2.000.000	Zr
V	100	100	Mo
Cr	400.000	50.000	IAEA 2004
Mn	200.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Fe	200.000.000	300.000.000	IAEA 2004
Co	50.000.000	300.000	IAEA 2004
Ni	300.000	20.000	IAEA 2004
Cu	9.000	2.000	Ba
Zn	200.000	70.000	IAEA 2004
Ga	9.000	2.000	Al
Ge	9.000	2.000	Ba
As	4.000	2.000	Sb
Se	1.000	3.000	IAEA 2004
Br	200	70	I
Rb	2.000	4.000	Cs
Sr	200	8	IAEA 2004
Y	7.000.000	900.000	IAEA 2004
Zr	7.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Nb	300.000	800.000	IAEA 2004
Mo	100	100	Tc
Tc	100	100	IAEA 2004
Ru	1.000	40.000	IAEA 2004
Rh	20.000	10.000	Ag
Pd	5.000	6.000	IAEA 2004
Ag	20.000	10.000	IAEA 2004
Cd	3.000	3.000	IAEA 2004
In	100.000	50.000	IAEA 2004
Sn	300.000	4.000.000	IAEA 2004
Sb	4.000	2.000	IAEA 2004

Fortsetzung Tabelle 3-7

Element	Verteilungskoeffizient K_d		
	offenes Meer	Küste	abgeleitet aus dem Element bzw. Quelle
Te	1.000	1.000	IAEA 2004
I	200	70	IAEA 2004
Cs	2.000	4.000	IAEA 2004
Ba	9.000	2.000	IAEA 2004
La	1.000.000	2.000.000	Pm
Ce	70.000.000	3.000.000	IAEA 2004
Pr	8.000.000	5.000.000	IAEA 2004
Nd	1.000.000	2.000.000	Pm
Pm	1.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Sm	500.000	3.000.000	IAEA 2004
Eu	2.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Gd	700.000	2.000.000	IAEA 2004
Tb	400.000	2.000.000	IAEA 2004
Dy	5.000.000	1.000.000	IAEA 2004
Ho	1.000.000	2.000.000	Pm
Er	1.000.000	2.000.000	Pm
Tm	200.000	1.000.000	IAEA 2004
Yb	200.000	1.000.000	IAEA 2004
Lu	1.000.000	2.000.000	Pm
Hf	6.000.000	10.000.000	IAEA 2004
Ta	50.000	200.000	IAEA 2004
W	1.000	30.000	IAEA 2004
Re	1.000.000	2.000.000	Pm
Os	1.000.000	2.000.000	Pm
Ir	3.000.000	100.000	IAEA 2004
Pt	20.000	10.000	Ag
Au	20.000	10.000	Ag
Hg	30.000	4.000	IAEA 2004
Tl	90.000	20.000	IAEA 2004
Pb	10.000.000	100.000	IAEA 2004
Bi	10.000.000	100.000	Pb
Po	20.000.000	20.000.000	IAEA 2004
At	200	70	I
Fr	2.000	4.000	Cs
Ra	4.000	2.000	IAEA 2004
Ac	2.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Th	5.000.000	3.000.000	IAEA 2004
Pa	5.000.000	5.000.000	IAEA 2004
U	500	1.000	IAEA 2004
Np	5.000	1.000	IAEA 2004
Pu	100.000	100.000	IAEA 2004
Am	2.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Cm	2.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Bk	2.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Cf	2.000.000	2.000.000	IAEA 2004
Es	2.000.000	2.000.000	Cf
Fm	2.000.000	2.000.000	Cf
Md	2.000.000	2.000.000	Cf

Die Berechnung der Aktivitätskonzentration in marinem Sediment erfolgt mit dem in /IAEA 2001/ beschriebenen Ansatz, hier angepasst an die Bezeichnungen der AVV zu § 47 StrlSchV:

$$C_r^{Se,spezif} = 0,1 \cdot K_{F,r} \cdot \frac{C_r^{Meer}}{1 + K_{F,r} \cdot S^{Se}} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_r \cdot t_{Se})}{\lambda_r \cdot t_{Se}} \quad (34)$$

Hierin bedeuten:

$C_r^{Se,spezif}$: spezifische Aktivität des Radionuklids r in abgelagertem Sediment in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

$K_{F,r}$: Übergangskonstante des Radionuklids r vom Meerwasser ins Sediment in $\text{l} \cdot \text{kg}^{-1}$

C_r^{Meer} : spezifische Aktivität des Radionuklids r im Meerwasser in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$

S^{Se} : Schwebstoffkonzentration im Meerwasser in $\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$

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

t_{Se} : Sedimentationsdauer in s

Für die Berechnung wird der in /IAEA 2001/ empfohlene Wert von $1 \cdot 10^{-5} \text{ kg l}^{-1}$ für die **Schwebstoffkonzentration** S^{Se} in küstennahen Gewässern verwendet. Für die **Sedimentationsdauer** werden entsprechend dem Vorgehen bei Fließgewässern nach /AVV 2005/ $1,57 \cdot 10^9$ s, entsprechend 50 Jahren, angesetzt.

Zur Berechnung der Strahlenexposition bei Aufenthalt auf Sediment ist die spezifische Aktivität des Sediments in eine oberflächenbezogene Kontamination umzurechnen. Die Strahlenexposition durch Aufenthalt auf Ufersediment errechnet sich dann – analog der Berechnung für Fließgewässer nach /AVV 2005/ - wie folgt:

$$H_{T,Se,r} = C_r^{Se,spezif} \cdot p^{Se} \cdot t_A \cdot f_U \cdot g_{b,r,T} \cdot (f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}) \quad (35)$$

Hierin bedeuten:

$H_{T,Se,r}$: Jahresdosis des Radionuklids r im Organ oder Gewebe T durch Aufenthalt auf Ufersediment in Sv

$C_r^{Se,spezif}$: spezifische Aktivität des Radionuklids r im marinen Sediment in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

p^{Se} : Flächentrockenmasse in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

t_A : jährliche Aufenthaltszeit am Ufer in s

f_U : Faktor, der die endliche Geometrie des Uferstreifens gegenüber einer unendlich ausgedehnten Flächenquelle berücksichtigt

- $g_{b,r,T}$: Dosiskoeffizient für das Organ oder Gewebe T des Radionuklids r bei Bodenstrahlung in $(\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1})/(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2})$
- f_r : Anteil des Gamma-Energieemissionspektrums des Radionuklids r oberhalb der Energie 0,2 MeV
- $c_{Geo,b1}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 1 bei Gamma-Energien von 1 MeV
- $c_{Geo,b2}$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson bei Bodenstrahlung für die Energiegruppe 2 bei Gamma-Energien von 0,1 MeV

Bei der Berechnung der Strahlenexposition der Referenzpersonen durch Aufenthalt auf marinem Ufersediment wird als **jährliche Aufenthaltszeit** der Wert 1000 Stunden (entsprechend der Annahme für Fließgewässer nach /AVV 2005/ angesetzt. Als **Uferfaktor** f_U wird der Wert 0,8 verwendet, um gegenüber Fließgewässern (dort 0,5 gemäß /AVV 2005/) größere freiliegende Sedimentbereiche zu berücksichtigen. Die **Flächentrockenmasse des marinen Sediments** wird mit 60 kg/m^2 angesetzt, entsprechend /IAEA 2001/.

3.1.4 Berücksichtigung von Tochternukliden

Bei der Berechnung der Strahlenexposition gemäß der AVV zu § 47 StrlSchV ist die Berücksichtigung von Dosisbeiträgen durch Tochternuklide über die Dosiskoeffizienten gewährleistet, da für die Berechnungen jeweils die herangezogen werden, die die Tochternuklide beinhalten. Dabei wird von einer gleichmäßigen Emission des Mutternuklids über 50 Jahre – entsprechend den Annahmen der AVV zu § 47 StrlSchV – ausgegangen.

Zur Berechnung von Expositionen von Flora und Fauna aufgrund der Aktivitätskonzentration in den relevanten Umweltmedien müssen die jeweiligen Konzentrationen von Tochternukliden zusätzlich ermittelt werden. Die hierzu verwendeten Annahmen und Überlegungen werden in Kapitel 2.2 beschrieben. Die hier abgeleiteten DCC beinhalten die Tochternuklide entsprechend den Gleichungen (3) und (4) in Kapitel 2.2.

3.2 Berechnung der zum Schutz des Menschen notwendigen Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Luft, Boden und Wasser

3.2.1 Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Luft

Entsprechend der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Vorgehensweise zur Berechnung der Dosis der Referenzpersonen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft wird die Konzentration in der bodennahen Luft und in Freisetzungshöhe ermittelt. Dazu wird die maximal mögliche jährliche Emission zugrunde gelegt, die bei Einhaltung der zulässigen Dosisgrenzwerte für das kritische Organ und die höchstexponierte Referenzperson möglich wäre. Es wird für die einzelnen Radionuklide jeweils die im Hinblick auf die Aufgabenstellung ungünstigste Lungenretentionsklasse verwendet, also diejenige, die beim Menschen zur geringsten Dosis führt. Ergeben sich Unterschiede von mehr als einem Faktor 5 für verschiedene Lungenretentionsklassen eines Radionuklids, so werden diese getrennt ausgewiesen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-8 aufgelistet.

Tabelle 3-8: Ermittelte maximal zulässige Emissionen und Aktivitätskonzentrationen in bodennaher Luft (z=0) und in Freisetzungshöhe (z=H)

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
H-3 (H ₂)	3,9E+15	1,6E+03	5,6E+03	V-49	8,9E+12	2,1E-01	7,3E-01
H-3 (OBT)	7,7E+12	1,8E-01	6,4E-01	Cr-48	4,5E+13	1,1E+00	3,8E+00
H-3 (HTO)	1,3E+14	3,8E+00	1,3E+01	Cr-49	4,1E+15	2,0E+01	7,0E+01
Be-7	2,6E+13	6,5E-01	2,3E+00	Cr-51	1,5E+13	3,4E-01	1,2E+00
Be-10	1,4E+11	3,2E-03	1,1E-02	Mn-51	4,1E+15	2,6E+01	9,0E+01
C-11	1,6E+16	4,0E-01	1,4E+00	Mn-52	5,4E+12	1,4E-01	4,8E-01
C-14	2,0E+12	1,3E-01	4,5E-01	Mn-52m	3,1E+15	1,3E+01	4,6E+01
N-13	1,7E+16	3,5E+01	1,2E+02	Mn-53	1,4E+12	4,1E-02	1,5E-01
F-18	2,0E+15	1,9E+01	6,6E+01	Mn-54	4,2E+11	1,1E-02	4,0E-02
O-15	2,1E+16	5,4E+01	1,9E+02	Mn-56	9,3E+14	1,0E+01	3,7E+01
Na-22	1,3E+10	3,4E-04	1,2E-03	Fe-52	9,8E+13	1,3E+00	4,6E+00
Na-24	1,3E+13	2,0E-01	7,0E-01	Fe-55	2,4E+11	5,6E-03	2,0E-02
Mg-28	5,3E+12	8,8E-02	3,1E-01	Fe-59	2,1E+11	5,0E-03	1,8E-02
Al-26	5,4E+09	1,6E-04	5,8E-04	Fe-60	1,9E+09	4,8E-05	1,7E-04
Si-31	8,4E+15	2,4E+01	8,3E+01	Co-55	8,6E+13	1,4E+00	5,1E+00
Si-32	2,1E+11	4,9E-03	1,7E-02	Co-56	2,4E+11	6,0E-03	2,1E-02
P-32	3,0E+10	7,0E-04	2,4E-03	Co-57	1,6E+12	3,8E-02	1,3E-01
P-33	3,6E+11	8,4E-03	2,9E-02	Co-58	8,8E+11	2,2E-02	7,8E-02
S-35 (anorg.)	1,2E+12	3,0E-02	1,0E-01	Co-58m	4,5E+14	1,3E+01	4,6E+01
S-35 (organisch)	2,0E+11	4,9E-03	1,7E-02	Co-60	2,7E+10	7,8E-04	2,7E-03
Ar-37	7,7E+15	3,2E+03	1,1E+04	Co-60m	1,0E+16	3,0E+02	1,0E+03
Ar-39	3,9E+15	1,6E+03	5,6E+03	Co-61	2,0E+16	5,5E+01	1,9E+02
Ar-41	1,3E+16	2,6E+01	9,0E+01	Co-62m	3,5E+15	1,2E+01	4,3E+01
Cl-36	2,9E+10	8,3E-04	2,9E-03	Ni-56	1,3E+12	3,0E-02	1,1E-01
Cl-38	3,6E+15	9,8E+00	3,4E+01	Ni-57	3,8E+12	7,3E-02	2,6E-01
Cl-39	2,6E+15	9,4E+00	3,3E+01	Ni-59	1,2E+12	3,1E-02	1,1E-01
K-42	7,3E+13	9,3E-01	3,3E+00	Ni-63	1,1E+12	2,5E-02	8,7E-02
K-43	6,2E+13	1,2E+00	4,1E+00	Ni-65	2,2E+15	4,7E+00	1,7E+01
K-44	3,4E+15	1,4E+01	4,9E+01	Ni-66	3,5E+11	7,2E-03	2,5E-02
K-45	4,1E+15	1,6E+01	5,5E+01	Cu-60	1,9E+15	8,1E+00	2,9E+01
Ca-41	8,7E+10	2,3E-03	8,1E-03	Cu-61	1,4E+15	1,4E+01	5,1E+01
Ca-45	2,6E+10	6,2E-04	2,2E-03	Cu-64	3,8E+14	5,0E+00	1,7E+01
Ca-47	3,0E+11	6,5E-03	2,3E-02	Cu-67	1,5E+13	3,1E-01	1,1E+00
Sc-43	8,8E+14	1,3E+01	4,4E+01	Zn-62	2,3E+13	2,4E-01	8,3E-01
Sc-44	4,7E+14	6,4E+00	2,3E+01	Zn-63	4,5E+15	2,0E+01	7,0E+01
Sc-44m	7,7E+12	1,6E-01	5,5E-01	Zn-65	3,4E+10	8,3E-04	2,9E-03
Sc-46	2,6E+11	6,3E-03	2,2E-02	Zn-69	9,0E+16	6,0E+01	2,1E+02
Sc-47	2,1E+13	4,4E-01	1,5E+00	Zn-69m	2,8E+13	3,7E-01	1,3E+00
Sc-48	2,1E+13	4,4E-01	1,6E+00	Zn-71m	4,6E+14	2,5E+00	8,9E+00
Sc-49	5,7E+16	1,8E+02	6,4E+02	Zn-72	1,5E+12	3,0E-02	1,0E-01
Ti-44	7,7E+09	2,3E-04	8,1E-04	Ga-65	5,8E+15	2,3E+01	8,2E+01
Ti-45	1,4E+15	1,5E+01	5,2E+01	Ga-66	1,6E+14	1,8E+00	6,4E+00
V-47	5,3E+15	2,5E+01	8,6E+01	Ga-67	4,5E+13	9,6E-01	3,4E+00
V-48	1,8E+12	4,2E-02	1,5E-01	Ga-68	3,2E+15	2,1E+01	7,3E+01

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Ga-70	3,3E+16	1,2E+02	4,3E+02	Kr-85	2,6E+17	1,0E+03	3,7E+03
Ga-72	9,2E+13	1,5E+00	5,2E+00	Kr-85m	5,7E+16	1,1E+02	3,9E+02
Ga-73	2,2E+15	1,1E+01	3,7E+01	Kr-87	2,2E+16	4,4E+01	1,5E+02
Ge-66	6,3E+14	1,1E+01	3,7E+01	Kr-88	8,7E+15	1,7E+01	6,0E+01
Ge-67	4,8E+15	1,7E+01	6,0E+01	Rb-79	4,4E+15	1,9E+01	6,6E+01
Ge-68	3,5E+09	8,5E-05	3,0E-04	Rb-81	1,2E+15	1,2E+01	4,2E+01
Ge-69	5,6E+13	1,1E+00	3,9E+00	Rb-81m	1,2E+16	2,2E+02	7,7E+02
Ge-71	4,1E+12	9,5E-02	3,3E-01	Rb-82m	2,1E+14	3,3E+00	1,2E+01
Ge-75	1,9E+16	3,8E+01	1,3E+02	Rb-83	2,3E+11	5,5E-03	1,9E-02
Ge-77	1,9E+14	2,7E+00	9,5E+00	Rb-84	2,2E+11	5,1E-03	1,8E-02
Ge-78	1,9E+15	1,9E+01	6,5E+01	Rb-86	2,0E+11	4,7E-03	1,7E-02
As-69	5,9E+15	2,9E+01	1,0E+02	Rb-87	8,1E+09	2,4E-04	8,5E-04
As-70	9,6E+14	6,6E+00	2,3E+01	Rb-88	1,3E+16	3,8E+01	1,3E+02
As-71	4,5E+13	9,5E-01	3,3E+00	Rb-89	4,5E+15	1,6E+01	5,6E+01
As-72	2,8E+13	5,0E-01	1,7E+00	Sr-80	1,4E+15	6,8E+00	2,4E+01
As-73	1,3E+12	2,9E-02	1,0E-01	Sr-81	3,4E+15	1,7E+01	6,1E+01
As-74	1,8E+12	4,1E-02	1,4E-01	Sr-82	1,1E+11	2,5E-03	8,9E-03
As-76	3,0E+13	5,1E-01	1,8E+00	Sr-83	2,9E+13	5,5E-01	1,9E+00
As-77	6,7E+13	1,3E+00	4,5E+00	Sr-85	5,5E+11	1,3E-02	4,7E-02
As-78	2,1E+15	1,7E+01	5,8E+01	Sr-85m	5,1E+15	7,7E+01	2,7E+02
Se-70	1,2E+15	5,9E+00	2,1E+01	Sr-87m	4,3E+15	4,9E+01	1,7E+02
Se-73	6,4E+13	5,3E-01	1,9E+00	Sr-89	7,9E+10	1,9E-03	6,5E-03
Se-73m	5,7E+15	2,9E+01	1,0E+02	Sr-90	1,1E+09	3,0E-05	1,0E-04
Se-75	2,8E+10	6,7E-04	2,4E-03	Sr-91	1,3E+14	1,4E+00	4,9E+00
Se-79	5,4E+08	1,6E-05	5,7E-05	Sr-92	9,4E+14	5,5E+00	1,9E+01
Se-81	1,0E+17	4,1E+01	1,4E+02	Y-86	7,3E+13	1,6E+00	5,5E+00
Se-81m	5,7E+16	8,0E+00	2,8E+01	Y-86m	1,5E+15	3,3E+01	1,2E+02
Se-83	2,9E+15	1,1E+01	3,8E+01	Y-87	3,3E+13	7,3E-01	2,5E+00
Br-74	1,6E+15	6,1E+00	2,1E+01	Y-88	3,3E+11	8,7E-03	3,0E-02
Br-74m	1,2E+15	3,6E+00	1,2E+01	Y-90	5,6E+12	1,1E-01	4,0E-01
Br-75	1,4E+15	3,2E+00	1,1E+01	Y-90m	1,9E+15	1,9E+01	6,5E+01
Br-76	8,9E+12	1,3E-01	4,7E-01	Y-91	1,4E+11	3,2E-03	1,1E-02
Br-77	1,1E+13	2,3E-01	8,2E-01	Y-91m	7,3E+15	4,8E+01	1,7E+02
Br-80	1,0E+17	3,9E+01	1,4E+02	Y-92	3,2E+15	1,0E+01	3,6E+01
Br-80m	2,3E+14	9,5E-01	3,3E+00	Y-93	2,0E+14	2,1E+00	7,3E+00
Br-82	3,4E+12	6,5E-02	2,3E-01	Y-94	7,0E+15	2,6E+01	9,1E+01
Br-83	3,9E+15	3,8E+00	1,3E+01	Y-95	1,1E+16	1,9E+02	6,7E+02
Br-84	3,4E+15	7,0E+00	2,4E+01	Zr-86	6,2E+13	1,5E+00	5,2E+00
Kr-74	1,1E+16	2,2E+01	7,9E+01	Zr-88	6,0E+11	1,7E-02	6,0E-02
Kr-76	3,5E+16	6,8E+01	2,4E+02	Zr-89	2,5E+13	5,3E-01	1,8E+00
Kr-77	1,3E+16	2,6E+01	9,2E+01	Zr-93	1,6E+11	3,7E-03	1,3E-02
Kr-79	6,3E+16	1,2E+02	4,3E+02	Zr-95	4,2E+11	9,9E-03	3,5E-02
Kr-81	4,1E+17	8,0E+02	2,8E+03	Zr-97	4,3E+13	5,1E-01	1,8E+00
Kr-81m	1,1E+15	4,7E+02	1,6E+03	Nb-88	1,6E+15	7,6E+00	2,7E+01

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Nb-89	8,0E+14	7,9E+00	2,8E+01	Rh-107	2,3E+16	7,2E+01	2,5E+02
Nb-90	2,5E+13	3,7E-01	1,3E+00	Pd-100	1,3E+12	2,9E-02	1,0E-01
Nb-93m	1,7E+11	4,1E-03	1,4E-02	Pd-101	3,2E+14	3,2E+00	1,1E+01
Nb-94	8,2E+09	2,5E-04	8,7E-04	Pd-103	1,1E+12	2,6E-02	9,1E-02
Nb-95	2,4E+11	5,6E-03	2,0E-02	Pd-107	9,2E+11	2,3E-02	8,1E-02
Nb-95m	3,2E+12	6,8E-02	2,4E-01	Pd-109	1,5E+13	1,9E-01	6,8E-01
Nb-96	1,4E+13	2,5E-01	8,7E-01	Ag-102	2,8E+15	9,1E+00	3,2E+01
Nb-97	4,4E+15	2,7E+01	9,6E+01	Ag-103	4,0E+15	1,0E+01	3,5E+01
Nb-98	1,5E+14	9,5E+00	3,3E+01	Ag-104	1,1E+15	6,3E+00	2,2E+01
Mo-90	1,5E+14	3,5E+00	1,2E+01	Ag-104m	4,6E+15	1,4E+01	4,8E+01
Mo-93	2,7E+10	7,4E-04	2,6E-03	Ag-105	1,9E+11	4,5E-03	1,6E-02
Mo-93m	2,7E+14	4,8E+00	1,7E+01	Ag-106	9,2E+15	2,5E+01	8,6E+01
Mo-99	1,8E+13	3,8E-01	1,3E+00	Ag-106m	1,6E+11	3,6E-03	1,3E-02
Mo-101	5,9E+15	2,3E+01	8,1E+01	Ag-108m	4,9E+09	1,5E-04	5,1E-04
Tc-93	1,0E+15	1,3E+01	4,5E+01	Ag-110m	2,2E+10	5,3E-04	1,9E-03
Tc-93m	2,9E+15	3,0E+01	1,1E+02	Ag-111	6,2E+10	1,4E-03	4,9E-03
Tc-94	3,0E+14	4,6E+00	1,6E+01	Ag-112	1,4E+14	2,9E-01	1,0E+00
Tc-94m	2,1E+15	1,2E+01	4,1E+01	Ag-115	8,4E+15	1,8E+01	6,3E+01
Tc-95	2,1E+14	4,5E+00	1,6E+01	Cd-104	1,5E+15	2,5E+01	8,7E+01
Tc-95m	4,9E+11	1,2E-02	4,3E-02	Cd-107	3,6E+15	2,2E+01	7,8E+01
Tc-96	8,7E+12	2,2E-01	7,6E-01	Cd-109	3,5E+10	8,6E-04	3,0E-03
Tc-96m	2,0E+15	5,2E+01	1,8E+02	Cd-113	7,5E+08	2,2E-05	7,8E-05
Tc-97m	1,3E+11	3,3E-03	1,2E-02	Cd-113m	1,4E+09	4,1E-05	1,4E-04
Tc-97	2,7E+11	7,8E-03	2,7E-02	Cd-115	5,3E+12	1,1E-01	3,8E-01
Tc-98	6,5E+09	1,9E-04	6,8E-04	Cd-115m	1,1E+11	2,5E-03	8,9E-03
Tc-99	2,4E+10	6,8E-04	2,4E-03	Cd-117	1,1E+15	8,4E+00	2,9E+01
Tc-99m	4,6E+15	4,9E+01	1,7E+02	Cd-117m	4,5E+14	5,7E+00	2,0E+01
Tc-101	2,7E+16	8,2E+01	2,9E+02	In-109	1,3E+15	2,0E+01	7,1E+01
Tc-104	4,3E+15	1,5E+01	5,1E+01	In-110	2,0E+15	1,4E+01	5,0E+01
Ru-94	2,0E+15	2,5E+01	8,7E+01	In-111	7,6E+13	1,6E+00	5,7E+00
Ru-97	1,7E+14	3,8E+00	1,3E+01	In-112	3,1E+16	1,0E+02	3,7E+02
Ru-103	9,5E+11	2,2E-02	7,8E-02	In-113m	8,1E+15	6,9E+01	2,4E+02
Ru-105	1,0E+15	1,2E+01	4,3E+01	In-114m	9,7E+10	2,3E-03	8,0E-03
Ru-106	2,9E+10	6,8E-04	2,4E-03	In-115m	5,0E+15	3,2E+01	1,1E+02
Rh-99	9,8E+11	2,3E-02	7,9E-02	In-116m	1,6E+15	1,1E+01	3,8E+01
Rh-99m	1,0E+15	9,4E+00	3,3E+01	In-117	5,9E+15	3,0E+01	1,0E+02
Rh-100	1,4E+13	2,4E-01	8,4E-01	In-117m	4,8E+15	3,9E+01	1,4E+02
Rh-101	2,3E+11	5,7E-03	2,0E-02	In-119m	2,2E+16	8,2E+01	2,9E+02
Rh-101m	5,4E+12	1,2E-01	4,2E-01	Sn-110	4,9E+14	3,1E+00	1,1E+01
Rh-102	4,2E+10	1,1E-03	4,0E-03	Sn-111	6,2E+15	4,9E+01	1,7E+02
Rh-102m	8,3E+10	2,0E-03	6,9E-03	Sn-113	1,3E+11	3,1E-03	1,1E-02
Rh-103m	3,2E+17	3,8E+02	1,3E+03	Sn-117m	7,3E+11	1,7E-02	5,9E-02
Rh-105	5,0E+12	9,4E-02	3,3E-01	Sn-119m	2,0E+11	4,7E-03	1,6E-02
Rh-106m	6,0E+14	4,8E+00	1,7E+01	Sn-121	3,3E+13	5,8E-01	2,0E+00

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Sn-121m	4,1E+10	1,2E-03	4,1E-03	I-123 (I ₂)	4,1E+13	4,2E-02	1,5E-01
Sn-123	3,8E+10	8,9E-04	3,1E-03	I-124 (I ₂)	6,6E+10	1,1E-04	4,0E-04
Sn-123m	2,4E+16	8,3E+01	2,9E+02	I-125 (I ₂)	1,2E+10	2,3E-05	8,1E-05
Sn-125	2,3E+11	5,2E-03	1,8E-02	I-126 (I ₂)	1,4E+10	2,5E-05	8,7E-05
Sn-126	3,0E+09	8,8E-05	3,1E-04	I-128 (I ₂)	1,3E+16	1,1E+01	4,0E+01
Sn-127	7,6E+14	7,9E+00	2,8E+01	I-129 (I ₂)	9,2E+08	2,1E-06	7,4E-06
Sn-128	1,4E+15	1,4E+01	4,9E+01	I-130 (I ₂)	4,6E+12	4,7E-03	1,6E-02
Sb-115	5,9E+15	3,0E+01	1,1E+02	I-131 (I ₂)	2,4E+10	4,3E-05	1,5E-04
Sb-116	4,0E+15	1,5E+01	5,3E+01	I-132 (I ₂)	7,2E+14	2,4E-01	8,3E-01
Sb-116m	1,1E+15	8,0E+00	2,8E+01	I-132m (I ₂)	1,1E+15	4,0E-01	1,4E+00
Sb-117	5,8E+15	5,3E+01	1,9E+02	I-133 (I ₂)	8,9E+11	1,2E-03	4,0E-03
Sb-118m	3,2E+14	4,1E+00	1,4E+01	I-134 (I ₂)	1,5E+15	3,2E+00	1,1E+01
Sb-119	7,1E+13	1,4E+00	4,8E+00	I-135 (I ₂)	2,8E+13	1,8E-02	6,2E-02
Sb-120	3,0E+12	7,1E-02	2,5E-01	I-120 (CH ₃)	1,5E+15	4,6E+00	1,6E+01
Sb-122	1,7E+12	3,5E-02	1,2E-01	I-120m (CH ₃)	3,1E+15	5,3E+00	1,9E+01
Sb-124	1,1E+11	2,6E-03	9,3E-03	I-121 (CH ₃)	6,8E+15	2,0E+01	6,9E+01
Sb-124m	5,6E+15	4,1E+01	1,4E+02	I-123 (CH ₃)	1,1E+15	2,5E+00	8,7E+00
Sb-125	1,7E+11	4,4E-03	1,5E-02	I-124 (CH ₃)	5,5E+12	1,1E-02	3,7E-02
Sb-126	5,7E+11	1,3E-02	4,6E-02	I-125 (CH ₃)	1,2E+12	2,3E-03	8,0E-03
Sb-126m	4,3E+15	1,9E+01	6,6E+01	I-126 (CH ₃)	1,3E+12	2,4E-03	8,4E-03
Sb-127	1,2E+12	2,6E-02	9,1E-02	I-128 (CH ₃)	2,0E+16	7,6E+01	2,6E+02
Sb-128	1,1E+14	1,1E+00	3,9E+00	I-129 (CH ₃)	9,2E+10	2,1E-04	7,4E-04
Sb-129	4,7E+14	2,5E+00	8,8E+00	I-130 (CH ₃)	1,2E+14	2,7E-01	9,5E-01
Sb-130	2,6E+16	9,0E+01	3,2E+02	I-131 (CH ₃)	2,2E+12	4,1E-03	1,4E-02
Sb-131	2,9E+15	1,5E+01	5,2E+01	I-132 (CH ₃)	1,5E+15	4,2E+00	1,5E+01
Te-116	7,0E+14	1,1E+01	4,0E+01	I-132m (CH ₃)	1,6E+15	5,3E+00	1,9E+01
Te-121	2,1E+12	5,1E-02	1,8E-01	I-133 (CH ₃)	3,9E+13	8,1E-02	2,8E-01
Te-121m	1,2E+10	3,1E-04	1,1E-03	I-134 (CH ₃)	6,2E+15	1,1E+01	3,8E+01
Te-123	3,2E+08	9,8E-06	3,4E-05	I-135 (CH ₃)	3,0E+14	7,4E-01	2,6E+00
Te-123m	1,8E+10	4,5E-04	1,6E-03	Xe-120	2,6E+16	5,1E+01	1,8E+02
Te-125m	5,1E+10	1,3E-03	4,4E-03	Xe-121	1,1E+16	2,2E+01	7,7E+01
Te-127	1,1E+15	1,0E+01	3,5E+01	Xe-122	1,8E+16	3,6E+01	1,3E+02
Te-127m	6,9E+09	1,7E-04	6,1E-04	Xe-123	2,0E+16	4,0E+01	1,4E+02
Te-129	2,0E+16	5,3E+01	1,9E+02	Xe-125	3,3E+16	6,5E+01	2,3E+02
Te-129m	2,5E+10	6,1E-04	2,1E-03	Xe-127	4,2E+16	8,2E+01	2,9E+02
Te-131	8,9E+15	3,6E+01	1,2E+02	Xe-129m	8,0E+16	1,6E+02	5,5E+02
Te-131m	7,3E+12	1,2E-01	4,4E-01	Xe-131m	1,9E+17	3,7E+02	1,3E+03
Te-132	9,1E+11	1,9E-02	6,7E-02	Xe-133	1,4E+17	2,7E+02	9,5E+02
Te-133	7,9E+15	2,9E+01	1,0E+02	Xe-133m	1,9E+17	3,7E+02	1,3E+03
Te-133m	1,3E+15	6,1E+00	2,1E+01	Xe-135	6,9E+16	1,3E+02	4,7E+02
Te-134	1,6E+15	1,6E+01	5,6E+01	Xe-135m	3,9E+16	7,9E+01	2,8E+02
I-120 (I ₂)	1,0E+15	4,1E-01	1,4E+00	Xe-138	1,4E+16	2,9E+01	1,0E+02
I-120m (I ₂)	7,4E+14	1,5E+00	5,4E+00	Cs-125	4,4E+15	3,2E+01	1,1E+02
I-121 (I ₂)	1,8E+15	1,1E+00	3,8E+00	Cs-127	8,5E+14	1,7E+01	5,9E+01

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Cs-129	2,0E+14	4,1E+00	1,5E+01	Pr-142m	1,3E+17	4,6E+02	1,6E+03
Cs-130	1,1E+16	4,8E+01	1,7E+02	Pr-143	1,9E+12	4,4E-02	1,6E-01
Cs-131	4,9E+13	1,1E+00	3,9E+00	Pr-144	5,2E+16	1,9E+02	6,5E+02
Cs-132	3,5E+14	3,2E+00	1,1E+01	Pr-145	1,6E+15	8,9E+00	3,1E+01
Cs-134	3,9E+10	9,5E-04	3,3E-03	Pr-147	9,5E+15	3,3E+01	1,2E+02
Cs-134m	8,6E+14	2,2E+01	7,6E+01	Nd-136	1,9E+15	2,0E+01	7,1E+01
Cs-135	2,6E+11	6,9E-03	2,4E-02	Nd-138	7,3E+14	5,7E+00	2,0E+01
Cs-135m	2,4E+15	1,6E+01	5,8E+01	Nd-139	9,0E+15	6,1E+01	2,1E+02
Cs-136	9,4E+11	2,2E-02	7,8E-02	Nd-139m	3,9E+14	6,7E+00	2,3E+01
Cs-137	2,6E+10	7,4E-04	2,6E-03	Nd-141	1,6E+16	1,7E+02	5,9E+02
Cs-138	2,5E+15	1,2E+01	4,2E+01	Nd-147	3,2E+12	7,3E-02	2,6E-01
Ba-126	1,7E+15	1,6E+01	5,4E+01	Nd-149	5,2E+15	3,6E+01	1,3E+02
Ba-128	4,7E+12	9,7E-02	3,4E-01	Nd-151	8,9E+15	3,2E+01	1,1E+02
Ba-131	9,6E+12	2,3E-01	7,9E-01	Pm-141	9,0E+15	3,8E+01	1,3E+02
Ba-131m	2,1E+16	1,6E+02	5,5E+02	Pm-143	2,2E+12	5,1E-02	1,8E-01
Ba-133	5,5E+10	1,5E-03	5,1E-03	Pm-144	5,5E+11	1,3E-02	4,6E-02
Ba-133m	3,4E+13	6,6E-01	2,3E+00	Pm-145	1,9E+12	4,5E-02	1,6E-01
Ba-135m	6,4E+13	1,1E+00	4,0E+00	Pm-146	1,0E+11	3,0E-03	1,0E-02
Ba-139	4,9E+16	9,7E+01	3,4E+02	Pm-147	5,8E+11	1,4E-02	4,8E-02
Ba-140	9,2E+11	2,1E-02	7,5E-02	Pm-148	3,0E+12	6,6E-02	2,3E-01
Ba-141	8,3E+15	3,2E+01	1,1E+02	Pm-148m	4,4E+11	1,0E-02	3,6E-02
Ba-142	5,1E+15	2,8E+01	9,8E+01	Pm-149	1,8E+13	3,6E-01	1,3E+00
La-131	3,1E+15	2,9E+01	1,0E+02	Pm-150	1,0E+15	1,1E+01	3,9E+01
La-132	4,2E+14	5,5E+00	1,9E+01	Pm-151	5,8E+13	1,0E+00	3,6E+00
La-135	3,6E+15	5,3E+01	1,9E+02	Sm-141	5,9E+15	2,2E+01	7,7E+01
La-137	3,2E+11	9,8E-03	3,4E-02	Sm-141m	2,7E+15	1,3E+01	4,4E+01
La-138	1,2E+10	3,6E-04	1,3E-03	Sm-142	2,7E+15	1,6E+01	5,7E+01
La-140	1,5E+13	3,0E-01	1,1E+00	Sm-145	1,0E+12	2,4E-02	8,4E-02
La-141	2,3E+15	8,5E+00	3,0E+01	Sm-146	1,1E+09	2,6E-05	9,0E-05
La-142	9,7E+14	8,3E+00	2,9E+01	Sm-151	1,6E+12	3,8E-02	1,4E-01
La-143	2,1E+16	7,7E+01	2,7E+02	Sm-153	2,9E+13	5,6E-01	2,0E+00
Ce-134	5,2E+12	1,1E-01	3,9E-01	Sm-155	3,8E+16	1,4E+02	4,8E+02
Ce-135	1,0E+14	1,8E+00	6,4E+00	Sm-156	2,9E+14	6,7E+00	2,4E+01
Ce-137	8,1E+15	9,5E+01	3,3E+02	Eu-145	1,3E+13	3,5E-01	1,2E+00
Ce-137m	5,8E+13	1,1E+00	3,7E+00	Eu-146	1,0E+13	2,6E-01	9,1E-01
Ce-139	1,1E+12	2,7E-02	9,4E-02	Eu-147	4,1E+12	9,8E-02	3,4E-01
Ce-141	8,7E+11	2,0E-02	7,1E-02	Eu-148	5,9E+11	1,5E-02	5,2E-02
Ce-143	3,0E+13	5,4E-01	1,9E+00	Eu-149	3,7E+12	8,7E-02	3,0E-01
Ce-144	3,2E+10	7,5E-04	2,6E-03	Eu-150	1,5E+10	4,5E-04	1,6E-03
Pr-136	4,6E+15	1,6E+01	5,6E+01	Eu-152	3,4E+10	1,0E-03	3,7E-03
Pr-137	5,1E+15	4,3E+01	1,5E+02	Eu-152m	5,5E+14	5,3E+00	1,9E+01
Pr-138m	7,4E+14	8,2E+00	2,9E+01	Eu-154	4,2E+10	1,2E-03	4,4E-03
Pr-139	2,9E+15	5,8E+01	2,0E+02	Eu-155	4,8E+11	1,1E-02	4,0E-02
Pr-142	5,3E+13	8,0E-01	2,8E+00	Eu-156	1,1E+12	2,5E-02	8,8E-02

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Eu-157	1,8E+14	2,4E+00	8,6E+00	Tm-162	5,0E+15	2,2E+01	7,6E+01
Eu-158	4,1E+15	2,4E+01	8,2E+01	Tm-166	2,8E+14	5,2E+00	1,8E+01
Gd-145	2,3E+15	1,3E+01	4,6E+01	Tm-167	8,2E+12	1,9E-01	6,5E-01
Gd-146	5,1E+11	1,2E-02	4,3E-02	Tm-170	1,6E+11	3,7E-03	1,3E-02
Gd-147	5,1E+13	1,3E+00	4,4E+00	Tm-171	1,4E+12	3,3E-02	1,2E-01
Gd-148	9,1E+08	2,2E-05	7,5E-05	Tm-172	9,6E+12	2,0E-01	6,9E-01
Gd-149	1,4E+13	3,2E-01	1,1E+00	Tm-173	9,4E+14	9,7E+00	3,4E+01
Gd-151	1,4E+12	3,2E-02	1,1E-01	Tm-175	8,2E+15	3,0E+01	1,0E+02
Gd-153	8,1E+11	1,9E-02	6,7E-02	Yb-162	6,7E+15	4,5E+01	1,6E+02
Gd-159	1,5E+14	2,0E+00	7,0E+00	Yb-166	2,5E+13	5,4E-01	1,9E+00
Tb-147	7,3E+14	1,0E+01	3,5E+01	Yb-167	1,7E+16	6,3E+01	2,2E+02
Tb-149	4,3E+14	2,5E+00	8,6E+00	Yb-169	1,1E+12	2,5E-02	8,9E-02
Tb-150	9,4E+15	2,8E+01	9,9E+01	Yb-175	2,2E+13	4,7E-01	1,6E+00
Tb-151	2,1E+14	4,5E+00	1,6E+01	Yb-177	8,7E+15	5,9E+01	2,1E+02
Tb-153	9,3E+13	1,9E+00	6,8E+00	Yb-178	1,9E+16	8,4E+01	2,9E+02
Tb-154	8,1E+13	1,8E+00	6,4E+00	Lu-169	7,9E+13	1,9E+00	6,8E+00
Tb-155	5,3E+13	1,2E+00	4,1E+00	Lu-170	3,1E+13	7,6E-01	2,7E+00
Tb-156	1,2E+13	2,7E-01	9,5E-01	Lu-171	1,1E+13	2,5E-01	8,7E-01
Tb-156m	4,4E+14	1,3E+01	4,5E+01	Lu-172	8,3E+12	1,9E-01	6,8E-01
Tb-157	4,2E+12	1,1E-01	3,7E-01	Lu-173	8,1E+11	1,9E-02	6,8E-02
Tb-158	1,9E+10	5,9E-04	2,1E-03	Lu-174	6,3E+11	1,5E-02	5,4E-02
Tb-160	2,2E+11	5,2E-03	1,8E-02	Lu-174m	3,9E+11	9,1E-03	3,2E-02
Tb-161	8,1E+12	1,8E-01	6,4E-01	Lu-176m	9,2E+15	3,1E+01	1,1E+02
Dy-155	5,6E+14	1,2E+01	4,0E+01	Lu-177	1,1E+13	2,5E-01	8,9E-01
Dy-157	1,3E+15	2,5E+01	8,7E+01	Lu-177m	1,4E+11	3,3E-03	1,2E-02
Dy-159	2,8E+12	6,6E-02	2,3E-01	Lu-178	4,4E+16	1,4E+02	4,8E+02
Dy-165	3,0E+16	7,4E+01	2,6E+02	Lu-178m	5,7E+15	2,4E+01	8,6E+01
Dy-166	5,9E+12	1,2E-01	4,4E-01	Lu-179	4,9E+15	2,0E+01	7,1E+01
Ho-155	4,0E+15	4,6E+01	1,6E+02	Hf-170	9,7E+13	2,4E+00	8,3E+00
Ho-157	1,3E+16	5,2E+01	1,8E+02	Hf-172	2,7E+10	6,4E-04	2,3E-03
Ho-159	1,1E+16	4,9E+01	1,7E+02	Hf-173	2,6E+14	5,5E+00	1,9E+01
Ho-161	1,7E+16	1,5E+02	5,2E+02	Hf-175	1,4E+11	3,3E-03	1,2E-02
Ho-162	4,3E+16	1,4E+02	4,9E+02	Hf-177m	1,6E+15	1,0E+01	3,6E+01
Ho-162m	4,5E+15	3,5E+01	1,2E+02	Hf-178m	5,2E+09	1,4E-04	4,9E-04
Ho-164	1,2E+17	4,0E+02	1,4E+03	Hf-179m	8,8E+10	2,1E-03	7,2E-03
Ho-164m	4,9E+16	2,4E+02	8,5E+02	Hf-180m	5,8E+15	2,7E+01	9,6E+01
Ho-166	2,9E+13	5,0E-01	1,8E+00	Hf-181	5,3E+10	1,2E-03	4,4E-03
Ho-166m	8,1E+09	2,5E-04	8,7E-04	Hf-182	4,9E+09	1,3E-04	4,6E-04
Ho-167	3,3E+15	3,7E+01	1,3E+02	Hf-182m	2,2E+15	2,1E+01	7,2E+01
Er-161	1,3E+15	1,8E+01	6,2E+01	Hf-183	3,2E+15	2,5E+01	8,7E+01
Er-165	8,2E+15	1,3E+02	4,5E+02	Hf-184	5,3E+14	6,1E+00	2,1E+01
Er-169	1,1E+13	2,5E-01	8,7E-01	Ta-172	1,7E+15	1,5E+01	5,3E+01
Er-171	1,0E+15	8,5E+00	3,0E+01	Ta-173	9,6E+14	1,5E+01	5,2E+01
Er-172	1,9E+13	3,9E-01	1,4E+00	Ta-174	4,1E+16	1,6E+02	5,5E+02

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Ta-175	3,1E+14	6,8E+00	2,4E+01	Ir-186	4,9E+13	7,1E-01	2,5E+00
Ta-176	2,7E+14	5,0E+00	1,7E+01	Ir-187	3,0E+14	3,5E+00	1,2E+01
Ta-177	1,8E+14	3,8E+00	1,3E+01	Ir-188	1,1E+13	2,1E-01	7,3E-01
Ta-178	1,6E+15	1,7E+01	6,1E+01	Ir-189	2,2E+12	5,0E-02	1,7E-01
Ta-179	3,3E+11	7,8E-03	2,7E-02	Ir-190	7,4E+11	1,7E-02	6,0E-02
Ta-180m	7,5E+15	6,5E+01	2,3E+02	Ir-190m	4,0E+14	5,7E+00	2,0E+01
Ta-182	2,0E+10	4,7E-04	1,7E-03	Ir-192	1,3E+11	3,1E-03	1,1E-02
Ta-182m	8,1E+15	5,4E+01	1,9E+02	Ir-192m	1,4E+10	4,4E-04	1,5E-03
Ta-183	1,1E+12	2,3E-02	8,2E-02	Ir-193m	1,9E+12	4,4E-02	1,5E-01
Ta-184	2,5E+14	4,1E+00	1,4E+01	Ir-194	6,0E+12	9,5E-02	3,3E-01
Ta-185	1,7E+16	6,4E+01	2,2E+02	Ir-194m	1,1E+11	2,5E-03	8,7E-03
Ta-186	6,1E+15	1,9E+01	6,7E+01	Ir-195	9,7E+15	1,5E+01	5,4E+01
W-176	8,5E+14	1,7E+01	6,0E+01	Ir-195m	1,2E+15	4,1E+00	1,4E+01
W-177	1,8E+15	1,8E+01	6,2E+01	Pt-186	1,2E+15	1,4E+01	4,9E+01
W-178	1,9E+12	4,4E-02	1,5E-01	Pt-188	3,1E+13	3,5E-01	1,2E+00
W-179	4,0E+16	2,1E+02	7,3E+02	Pt-189	2,6E+14	3,1E+00	1,1E+01
W-181	1,5E+12	3,5E-02	1,2E-01	Pt-191	6,8E+12	1,4E-01	5,0E-01
W-185	2,1E+11	5,0E-03	1,7E-02	Pt-193	3,1E+11	9,2E-03	3,2E-02
W-187	4,5E+13	7,0E-01	2,5E+00	Pt-193m	2,3E+12	5,0E-02	1,8E-01
W-188	4,2E+10	9,9E-04	3,5E-03	Pt-195m	1,8E+12	4,0E-02	1,4E-01
Re-177	8,2E+15	3,7E+01	1,3E+02	Pt-197	2,1E+13	3,3E-01	1,1E+00
Re-178	7,5E+15	2,5E+01	8,8E+01	Pt-197m	1,9E+16	3,0E+01	1,1E+02
Re-181	3,8E+13	5,9E-01	2,1E+00	Pt-199	2,1E+16	6,8E+01	2,4E+02
Re-182	4,6E+12	9,5E-02	3,3E-01	Pt-200	1,4E+13	1,7E-01	6,1E-01
Re-184	4,4E+11	1,0E-02	3,7E-02	Au-193	7,2E+14	9,2E+00	3,2E+01
Re-184m	7,6E+10	1,8E-03	6,4E-03	Au-194	8,1E+13	1,9E+00	6,8E+00
Re-186	2,1E+12	4,6E-02	1,6E-01	Au-195	8,8E+11	2,1E-02	7,3E-02
Re-186m	4,8E+09	1,4E-04	4,9E-04	Au-198	1,6E+13	3,1E-01	1,1E+00
Re-187	2,3E+12	6,8E-02	2,4E-01	Au-198m	1,5E+13	3,0E-01	1,0E+00
Re-188	1,0E+13	1,5E-01	5,2E-01	Au-199	3,1E+13	6,3E-01	2,2E+00
Re-188m	3,4E+16	9,2E+01	3,2E+02	Au-200	1,5E+16	5,0E+01	1,8E+02
Re-189	1,3E+13	2,1E-01	7,4E-01	Au-200m	7,6E+13	1,2E+00	4,1E+00
Os-180	4,7E+15	1,8E+01	6,2E+01	Au-201	4,3E+16	1,5E+02	5,1E+02
Os-181	1,1E+15	1,2E+01	4,3E+01	Hg-193 (org.)	2,6E+15	3,8E+01	1,3E+02
Os-182	1,7E+13	2,9E-01	1,0E+00	Hg-193 (anorg.)	2,6E+15	1,1E+01	3,7E+01
Os-185	1,4E+11	3,4E-03	1,2E-02	Hg-193m (org.)	3,0E+14	6,3E+00	2,2E+01
Os-189m	4,8E+15	2,9E+01	1,0E+02	Hg-193m (anorg.)	2,6E+14	2,8E+00	9,7E+00
Os-191	2,3E+11	5,4E-03	1,9E-02	Hg-194 (org.)	1,6E+01	4,5E-13	1,6E-12
Os-191m	1,5E+14	2,0E+00	6,9E+00	Hg-194 (anorg.)	1,1E+10	3,2E-04	1,1E-03
Os-193	5,0E+12	9,2E-02	3,2E-01	Hg-195 (org.)	1,4E+15	2,8E+01	9,8E+01
Os-194	6,0E+09	1,5E-04	5,1E-04	Hg-195 (anorg.)	1,2E+15	8,7E+00	3,0E+01
Ir-182	4,1E+15	2,0E+01	6,8E+01	Hg-195m (org.)	1,4E+14	2,7E+00	9,4E+00
Ir-184	6,9E+14	6,5E+00	2,3E+01	Hg-195m (anorg.)	3,5E+13	5,5E-01	1,9E+00
Ir-185	7,6E+13	1,1E+00	3,7E+00	Hg-197 (org.)	1,5E+14	3,1E+00	1,1E+01

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
Hg-197 (anorg.)	4,1E+13	7,6E-01	2,7E+00	Po-203	1,7E+15	1,4E+01	4,9E+01
Hg-197m (org.)	4,0E+14	6,6E+00	2,3E+01	Po-205	7,2E+14	1,0E+01	3,6E+01
Hg-197m (anorg.)	7,4E+13	9,4E-01	3,3E+00	Po-207	3,2E+14	6,5E+00	2,3E+01
Hg-199m (org.)	1,9E+16	7,9E+01	2,8E+02	Po-210	4,6E+07	1,1E-06	3,8E-06
Hg-199m (anorg.)	1,4E+16	4,7E+01	1,6E+02	At-207	5,5E+14	1,1E+00	4,0E+00
Hg-203 (org.)	5,0E+10	1,2E-03	4,1E-03	At-211	8,4E+11	6,8E-03	2,4E-02
Hg-203 (anorg.)	1,0E+11	2,4E-03	8,4E-03	Fr-222	7,7E+13	3,0E-01	1,1E+00
Tl-194	6,0E+15	3,3E+01	1,1E+02	Fr-223	2,6E+15	5,3E+00	1,8E+01
Tl-194m	2,2E+15	1,1E+01	3,9E+01	Ra-223	1,2E+09	2,8E-05	9,9E-05
Tl-195	2,4E+15	2,0E+01	6,9E+01	Ra-224	6,0E+09	1,3E-04	4,5E-04
Tl-197	2,8E+15	2,9E+01	1,0E+02	Ra-225	7,6E+08	1,7E-05	6,1E-05
Tl-198	4,0E+14	6,0E+00	2,1E+01	Ra-226	1,0E+08	2,5E-06	8,7E-06
Tl-198m	9,9E+14	1,2E+01	4,2E+01	Ra-227	1,1E+16	2,9E+01	1,0E+02
Tl-199	1,6E+15	2,2E+01	7,6E+01	Ra-228	2,9E+07	6,8E-07	2,4E-06
Tl-200	7,0E+13	1,5E+00	5,2E+00	Ac-224	1,5E+14	5,8E-01	2,0E+00
Tl-201	6,1E+13	1,3E+00	4,5E+00	Ac-225	6,9E+10	1,6E-03	5,5E-03
Tl-202	2,8E+12	6,4E-02	2,3E-01	Ac-226	3,6E+12	3,7E-02	1,3E-01
Tl-204	2,3E+10	5,9E-04	2,1E-03	Ac-227	5,0E+07	1,2E-06	4,1E-06
Pb-195m	3,6E+15	1,7E+01	6,1E+01	Ac-228	2,2E+14	8,3E-01	2,9E+00
Pb-198	7,3E+14	1,5E+01	5,3E+01	Th-226	4,9E+13	1,9E-01	6,7E-01
Pb-199	1,5E+15	1,5E+01	5,1E+01	Th-227	6,8E+10	1,1E-03	4,0E-03
Pb-200	1,0E+14	2,5E+00	8,8E+00	Th-228	4,8E+08	1,1E-05	4,0E-05
Pb-201	4,9E+14	9,0E+00	3,1E+01	Th-229	1,6E+08	3,7E-06	1,3E-05
Pb-202	1,8E+10	4,7E-04	1,6E-03	Th-230	3,8E+08	8,9E-06	3,1E-05
Pb-202m	5,4E+14	7,6E+00	2,7E+01	Th-231	1,4E+14	2,3E+00	7,9E+00
Pb-203	1,0E+14	2,2E+00	7,7E+00	Th-232	3,5E+08	8,1E-06	2,9E-05
Pb-205	6,0E+11	1,5E-02	5,1E-02	Th-234	2,7E+11	6,3E-03	2,2E-02
Pb-209	2,5E+16	7,5E+01	2,6E+02	Pa-227	3,0E+13	1,1E-01	4,0E-01
Pb-210	1,5E+08	3,6E-06	1,2E-05	Pa-228	4,3E+13	2,4E-01	8,5E-01
Pb-211	3,3E+14	1,3E+00	4,4E+00	Pa-230	6,9E+11	1,5E-02	5,4E-02
Pb-212	7,2E+12	6,6E-02	2,3E-01	Pa-231	7,1E+07	1,7E-06	5,9E-06
Pb-214	3,0E+14	1,2E+00	4,1E+00	Pa-232	6,3E+13	1,2E+00	4,2E+00
Bi-200	1,5E+15	1,0E+01	3,7E+01	Pa-233	9,2E+11	2,1E-02	7,5E-02
Bi-201	1,0E+15	1,2E+01	4,1E+01	Pa-234	3,3E+14	5,0E+00	1,7E+01
Bi-202	9,3E+14	8,7E+00	3,1E+01	U-230	1,9E+10	4,4E-04	1,5E-03
Bi-203	1,3E+14	2,6E+00	9,1E+00	U-231	2,1E+13	4,7E-01	1,6E+00
Bi-205	3,0E+12	7,7E-02	2,7E-01	U-232	5,7E+08	1,3E-05	4,7E-05
Bi-206	3,9E+12	9,0E-02	3,2E-01	U-233	5,2E+09	1,2E-04	4,3E-04
Bi-207	1,3E+10	4,0E-04	1,4E-03	U-234	5,4E+09	1,3E-04	4,5E-04
Bi-210	3,2E+12	7,1E-02	2,5E-01	U-235	5,6E+09	1,3E-04	4,7E-04
Bi-210m	7,3E+08	2,1E-05	7,4E-05	U-236	5,7E+09	1,3E-04	4,7E-04
Bi-212	9,7E+13	3,7E-01	1,3E+00	U-237	5,1E+12	1,1E-01	4,0E-01
Bi-213	7,9E+13	3,0E-01	1,1E+00	U-238	6,0E+09	1,4E-04	5,0E-04
Bi-214	1,3E+14	5,0E-01	1,8E+00	U-239	3,6E+16	1,8E+02	6,4E+02

Fortsetzung Tabelle 3-8

Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H	Nuklid	Bq/a	Bq/m ³ z=0	Bq/m ³ z=H
U-240	6,2E+13	8,4E-01	3,0E+00	Cm-240	5,1E+10	1,2E-03	4,1E-03
Np-232	5,8E+15	2,4E+01	8,4E+01	Cm-241	9,2E+11	2,2E-02	7,6E-02
Np-233	4,2E+16	1,7E+02	6,0E+02	Cm-242	3,6E+09	8,5E-05	3,0E-04
Np-234	2,0E+13	4,8E-01	1,7E+00	Cm-243	6,1E+08	1,4E-05	5,1E-05
Np-235	3,2E+12	7,5E-02	2,6E-01	Cm-244	6,7E+08	1,6E-05	5,5E-05
Np-236	7,3E+09	1,8E-04	6,5E-04	Cm-245	5,7E+08	1,3E-05	4,7E-05
Np-237	7,2E+08	1,8E-05	6,3E-05	Cm-246	5,7E+08	1,3E-05	4,7E-05
Np-238	2,5E+13	5,0E-01	1,8E+00	Cm-247	6,2E+08	1,5E-05	5,1E-05
Np-239	2,3E+13	4,7E-01	1,6E+00	Cm-248	1,5E+08	3,6E-06	1,3E-05
Np-240	2,4E+15	1,6E+01	5,5E+01	Cm-249	3,6E+16	1,3E+02	4,7E+02
Pu-234	3,1E+14	1,4E+00	5,1E+00	Cm-250	2,8E+07	6,6E-07	2,3E-06
Pu-235	4,5E+16	1,6E+02	5,7E+02	Bk-245	1,7E+13	3,7E-01	1,3E+00
Pu-236	1,1E+09	2,6E-05	9,2E-05	Bk-246	7,4E+13	1,7E+00	5,9E+00
Pu-237	5,3E+12	1,2E-01	4,3E-01	Bk-247	1,8E+08	4,3E-06	1,5E-05
Pu-238	7,0E+08	1,7E-05	5,8E-05	Bk-249	9,5E+10	2,2E-03	7,7E-03
Pu-239	6,4E+08	1,5E-05	5,3E-05	Bk-250	1,4E+15	6,6E+00	2,3E+01
Pu-240	6,4E+08	1,5E-05	5,3E-05	Cf-244	1,1E+14	4,2E-01	1,5E+00
Pu-241	4,0E+10	9,5E-04	3,3E-03	Cf-246	7,1E+12	2,7E-02	9,5E-02
Pu-242	6,7E+08	1,6E-05	5,5E-05	Cf-248	1,7E+09	4,1E-05	1,4E-04
Pu-243	7,8E+15	3,3E+01	1,2E+02	Cf-249	1,8E+08	4,1E-06	1,5E-05
Pu-244	6,8E+08	1,6E-05	5,6E-05	Cf-250	3,4E+08	8,0E-06	2,8E-05
Pu-245	2,8E+14	2,5E+00	8,9E+00	Cf-251	1,7E+08	4,1E-06	1,4E-05
Pu-246	1,2E+12	2,8E-02	9,8E-02	Cf-252	4,6E+08	1,1E-05	3,7E-05
Am-237	6,4E+15	4,9E+01	1,7E+02	Cf-253	2,3E+11	5,0E-03	1,8E-02
Am-238	2,6E+15	2,3E+01	7,9E+01	Cf-254	5,0E+08	1,2E-05	4,1E-05
Am-239	7,3E+14	7,5E+00	2,6E+01	Es-250	2,7E+15	1,0E+01	3,6E+01
Am-240	5,4E+13	1,1E+00	4,0E+00	Es-251	2,2E+14	4,0E+00	1,4E+01
Am-241	5,7E+08	1,3E-05	4,7E-05	Es-253	1,5E+11	3,3E-03	1,2E-02
Am-242	2,3E+14	8,9E-01	3,1E+00	Es-254	2,0E+09	4,6E-05	1,6E-04
Am-242m	6,6E+08	1,6E-05	5,5E-05	Es-254m	5,9E+12	2,6E-02	9,1E-02
Am-243	5,8E+08	1,4E-05	4,8E-05	Fm-252	1,0E+13	3,9E-02	1,4E-01
Am-244	4,0E+14	4,5E+00	1,6E+01	Fm-253	8,2E+12	3,1E-02	1,1E-01
Am-244m	3,5E+16	1,3E+02	4,5E+02	Fm-254	4,5E+13	1,7E-01	6,0E-01
Am-245	2,8E+16	8,6E+01	3,0E+02	Fm-255	1,2E+13	4,4E-02	1,6E-01
Am-246	6,3E+15	2,9E+01	1,0E+02	Fm-257	3,6E+09	8,5E-05	3,0E-04
Am-246m	6,6E+15	2,8E+01	9,8E+01	Md-257	1,4E+14	5,2E-01	1,8E+00
Cm-238	1,3E+15	5,0E+00	1,8E+01	Md-258	8,7E+09	2,0E-04	7,0E-04

3.2.2 Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Boden

Entsprechend der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Vorgehensweise zur Berechnung der Dosis der Referenzpersonen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft wird die flächenbezogene Ablagerung durch Fall- und Washout auf dem Boden ermittelt. Da sich die Dosiskonversionskoeffizienten für Biota auf die massenbezogene Kontamination des Bodens beziehen, wird diese über eine Massenbelegung von

120 kg TM¹² m⁻² berechnet. Dies entspricht der Massenbelegung von Weideboden nach /AVV 2005/ und näherungsweise der Massenbelegung von Weideboden nach /IAEA 2001/ für alle anderen Böden als Torfböden von 130 kg TM m⁻². Die abgelagerte Aktivität ist dann in einer Bodenschicht von 10 cm homogen verteilt.

Da eine Ablagerung über 50 Jahre berücksichtigt wird, ergibt sich die insgesamt nach 50 Jahren vorliegende Aktivität nach der Gleichung

$$B_r = \dot{A}_r \cdot (F_{G,r} + W_{G,r}) \cdot \int_0^{t_b} \exp[-\lambda_r \cdot (t_b - t)] dt = \dot{A}_r \cdot (F_{G,r} + W_{G,r}) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_r \cdot t_b)}{\lambda_r} \quad (36)$$

Hierin bedeuten:

B_r : auf dem Boden abgelagerte Aktivität des Radionuklids r nach der Zeit t_b in Bq·m⁻²

\dot{A}_r : Freisetzungsrate des Radionuklids r in Bq·s⁻¹

$F_{G,r}$: Langzeitfalloutfaktor für das Gesamtjahr und das Radionuklid r in m⁻²

$W_{G,r}$: Langzeitwashoutfaktor für das Gesamtjahr und das Radionuklid r in m⁻²

t_b : Ablagerungszeit in s

λ_r : Zerfallskonstante des Nuklids r in s⁻¹

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-9 aufgelistet.

Die Beregnung mit Wasser aus einem Fließgewässer mit der maximal im Hinblick auf den Schutz des Menschen zulässigen Konzentration radioaktiver Stoffe (siehe Kapitel 3.2.3) führt ebenfalls zu einer Kontamination von Boden. Ein Vergleich der sich aus der Beregnung über 50 Jahre ergebenden Aktivitätskonzentration mit der für Ableitungen mit der Fortluft Ermittelten hat ergeben, dass die durch Ableitungen mit der Fortluft für alle Radionuklide größer ist. Im Folgenden wird daher nur diese betrachtet.

¹² Trockenmasse

Tabelle 3-9: Ermittelte maximal zulässige Bodenkontamination in Bq/kg TM

Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/ kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg
Be-7	6,6E+02	Mn-56	3,9E+01	Ge-75	6,9E+01	Sr-83	1,4E+01
Be-10	7,6E+02	Fe-52	5,3E+00	Ge-77	1,6E+01	Sr-85	1,6E+01
F-18	5,7E+01	Fe-55	1,0E+02	Ge-78	3,4E+01	Sr-85m	1,2E+02
Na-22	6,1E+00	Fe-59	4,2E+00	As-69	1,4E+01	Sr-87m	1,9E+02
Na-24	2,3E+00	Fe-60	1,1E+01	As-70	1,1E+01	Sr-89	1,8E+00
Mg-28	1,4E+00	Co-55	1,3E+01	As-71	4,5E+01	Sr-90	4,2E+00
Al-26	4,0E+01	Co-56	8,9E+00	As-72	8,7E+00	Sr-91	1,0E+01
Si-31	6,0E+01	Co-57	2,0E+02	As-73	4,5E+01	Sr-92	2,6E+01
Si-32	1,1E+03	Co-58	3,0E+01	As-74	1,4E+01	Y-86	1,5E+01
P-32	1,9E-01	Co-58m	8,9E+01	As-76	9,1E+00	Y-86m	2,5E+01
P-33	4,0E+00	Co-60	2,9E+01	As-77	3,5E+01	Y-87	4,3E+01
S-35	4,9E+01	Co-60m	3,9E+01	As-78	4,0E+01	Y-88	1,8E+01
S-35	8,0E+00	Co-61	8,9E+01	Se-70	1,4E+01	Y-90	5,1E+00
Cl-36	2,0E+02	Co-62m	5,7E+00	Se-73	3,0E+00	Y-90m	5,7E+01
Cl-38	2,4E+01	Ni-56	3,5E+00	Se-73m	6,1E+01	Y-91	3,6E+00
Cl-39	3,1E+01	Ni-57	2,1E+00	Se-75	1,5E+00	Y-91m	7,5E+01
K-42	8,8E+00	Ni-59	7,3E+03	Se-79	3,9E+00	Y-92	3,1E+01
K-43	2,0E+01	Ni-63	5,0E+03	Se-81	8,4E+01	Y-93	7,3E+00
K-44	1,1E+01	Ni-65	2,4E+01	Se-81m	1,5E+02	Y-94	1,6E+01
K-45	1,1E+01	Ni-66	3,1E-01	Se-83	1,0E+01	Y-95	2,3E+01
Ca-41	5,5E+02	Cu-60	6,7E+00	Br-74	6,7E+00	Zr-86	8,8E+00
Ca-45	1,9E+00	Cu-61	6,0E+01	Br-74m	9,9E+00	Zr-88	2,7E+01
Ca-47	5,6E-01	Cu-64	4,8E+01	Br-75	3,3E+01	Zr-89	2,3E+01
Sc-43	5,6E+01	Cu-67	1,5E+01	Br-76	1,7E+00	Zr-93	8,9E+02
Sc-44	2,9E+01	Zn-62	1,7E+00	Br-77	1,0E+01	Zr-95	1,2E+01
Sc-44m	6,6E+00	Zn-63	2,8E+01	Br-80	1,3E+02	Zr-97	2,8E+00
Sc-46	9,9E+00	Zn-65	3,8E+00	Br-80m	3,3E+00	Nb-88	3,5E+00
Sc-47	2,6E+01	Zn-69	2,3E+02	Br-82	1,8E+00	Nb-89	2,0E+01
Sc-48	1,4E+01	Zn-69m	4,0E+00	Br-83	2,5E+01	Nb-90	4,2E+00
Sc-49	1,5E+02	Zn-71m	8,3E+00	Br-84	1,9E+01	Nb-93m	3,5E+02
Ti-44	4,0E+01	Zn-72	1,1E+00	Rb-79	1,5E+01	Nb-94	6,0E+01
Ti-45	5,2E+01	Ga-65	1,1E+01	Rb-81	3,9E+01	Nb-95	3,7E+00
V-47	2,2E+01	Ga-66	6,6E+00	Rb-81m	1,2E+02	Nb-95m	4,7E+00
V-48	1,3E+01	Ga-67	5,8E+01	Rb-82m	1,6E+01	Nb-96	4,5E+00
V-49	1,3E+03	Ga-68	3,3E+01	Rb-83	9,0E+00	Nb-97	5,0E+01
Cr-48	2,0E+01	Ga-70	3,1E+01	Rb-84	3,2E+00	Nb-98	6,6E+00
Cr-49	2,5E+01	Ga-72	6,5E+00	Rb-86	1,7E+00	Mo-90	1,5E+01
Cr-51	1,8E+02	Ga-73	3,4E+01	Rb-87	5,8E+01	Mo-93	1,8E+02
Mn-51	3,8E+01	Ge-66	2,6E+01	Rb-88	2,0E+01	Mo-93m	2,7E+01
Mn-52	1,4E+01	Ge-67	8,8E+00	Rb-89	8,8E+00	Mo-99	2,0E+01
Mn-52m	9,9E+00	Ge-68	4,6E-01	Sr-80	2,3E+01	Mo-101	1,2E+01
Mn-53	9,9E+03	Ge-69	2,8E+01	Sr-81	1,4E+01	Tc-93	4,7E+01
Mn-54	6,8E+01	Ge-71	2,1E+01	Sr-82	1,2E+00	Tc-93m	3,1E+01

Fortsetzung Tabelle 3-9

Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg
Tc-94	2,3E+01	Ag-111	2,0E-01	Sb-122	1,8E+00	I-120 (CH ₃ I)	8,3E-02
Tc-94m	1,6E+01	Ag-112	1,2E+00	Sb-124	3,0E+00	I-120m (CH ₃ I)	1,2E-01
Tc-95	5,6E+01	Ag-115	1,5E+01	Sb-124m	2,5E+01	I-121 (CH ₃ I)	5,9E-01
Tc-95m	1,4E+01	Cd-104	2,6E+01	Sb-125	8,2E+01	I-123 (CH ₃ I)	6,1E-01
Tc-96	1,6E+01	Cd-107	6,3E+01	Sb-126	3,1E+00	I-124 (CH ₃ I)	2,3E-02
Tc-96m	3,8E+01	Cd-109	7,3E+00	Sb-126m	1,2E+01	I-125 (CH ₃ I)	7,3E-02
Tc-97m	5,7E+00	Cd-113	5,4E+00	Sb-127	1,9E+00	I-126 (CH ₃ I)	1,6E-02
Tc-97	1,9E+03	Cd-113m	3,6E+00	Sb-128	7,6E+00	I-128 (CH ₃ I)	3,4E-01
Tc-98	4,7E+01	Cd-115	4,0E+00	Sb-129	8,0E+00	I-129 (CH ₃ I)	1,1E+00
Tc-99	1,6E+02	Cd-115m	2,1E+00	Sb-130	4,6E+01	I-130 (CH ₃ I)	6,2E-02
Tc-99m	1,9E+02	Cd-117	2,3E+01	Sb-131	1,1E+01	I-131 (CH ₃ I)	1,7E-02
Tc-101	2,3E+01	Cd-117m	2,1E+01	Te-116	3,0E+01	I-132 (CH ₃ I)	1,4E-01
Tc-104	6,7E+00	In-109	9,4E+01	Te-121	1,6E+01	I-132m (CH ₃ I)	9,2E-02
Ru-94	2,6E+01	In-110	2,5E+01	Te-121m	9,0E-01	I-133 (CH ₃ I)	3,3E-02
Ru-97	1,8E+02	In-111	6,9E+01	Te-123	2,3E+00	I-134 (CH ₃ I)	2,5E-01
Ru-103	1,7E+01	In-112	4,6E+01	Te-123m	1,0E+00	I-135 (CH ₃ I)	8,1E-02
Ru-105	4,5E+01	In-113m	1,6E+02	Te-125m	1,4E+00	Cs-125	4,5E+01
Ru-106	4,7E+00	In-114m	2,1E+00	Te-127	3,4E+01	Cs-127	7,8E+01
Rh-99	6,4E+00	In-115m	1,0E+02	Te-127m	3,5E-01	Cs-129	1,0E+02
Rh-99m	3,0E+01	In-116m	1,7E+01	Te-129	6,2E+01	Cs-130	5,0E+01
Rh-100	3,9E+00	In-117	3,8E+01	Te-129m	3,8E-01	Cs-131	2,0E+02
Rh-101	1,3E+02	In-117m	6,9E+01	Te-131	1,4E+01	Cs-132	1,5E+01
Rh-101m	9,7E+00	In-119m	1,7E+01	Te-131m	2,1E+00	Cs-134	1,4E+01
Rh-102	2,3E+01	Sn-110	9,7E+00	Te-132	1,0E+00	Cs-134m	5,5E+01
Rh-102m	7,6E+00	Sn-111	5,1E+01	Te-133	5,5E+00	Cs-135	1,7E+03
Rh-103m	8,0E+02	Sn-113	6,7E+00	Te-133m	6,1E+00	Cs-135m	2,7E+01
Rh-105	2,6E+00	Sn-117m	4,5E+00	Te-134	1,4E+01	Cs-136	5,5E+00
Rh-106m	1,8E+01	Sn-119m	2,2E+01	I-120 (I ₂)	5,7E+00	Cs-137	1,1E+02
Rh-107	3,8E+01	Sn-121	1,2E+01	I-120m (I ₂)	7,5E+00	Cs-138	1,3E+01
Pd-100	2,0E+00	Sn-121m	2,1E+02	I-121 (I ₂)	3,1E+01	Ba-126	4,1E+01
Pd-101	2,1E+01	Sn-123	2,2E+00	I-123 (I ₂)	2,2E+00	Ba-128	4,2E+00
Pd-103	8,4E+00	Sn-123m	1,1E+02	I-124 (I ₂)	2,7E-02	Ba-131	5,0E+01
Pd-107	5,5E+03	Sn-125	9,4E-01	I-125 (I ₂)	7,4E-02	Ba-131m	6,9E+01
Pd-109	2,0E+00	Sn-126	2,1E+01	I-126 (I ₂)	1,8E-02	Ba-133	1,0E+02
Ag-102	4,4E+00	Sn-127	2,7E+01	I-128 (I ₂)	2,2E+01	Ba-133m	1,9E+01
Ag-103	4,9E+01	Sn-128	2,2E+01	I-129 (I ₂)	1,2E+00	Ba-135m	2,3E+01
Ag-104	1,8E+01	Sb-115	3,3E+01	I-130 (I ₂)	2,4E-01	Ba-139	2,5E+02
Ag-104m	2,2E+01	Sb-116	8,9E+00	I-131 (I ₂)	1,9E-02	Ba-140	5,1E+00
Ag-105	3,5E+00	Sb-116m	1,5E+01	I-132 (I ₂)	7,3E+00	Ba-141	2,0E+01
Ag-106	2,7E+01	Sb-117	2,5E+02	I-132m (I ₂)	6,0E+00	Ba-142	9,2E+00
Ag-106m	5,8E-01	Sb-118m	1,7E+01	I-133 (I ₂)	7,7E-02	La-131	4,4E+01
Ag-108m	3,1E+01	Sb-119	4,1E+01	I-134 (I ₂)	1,5E+01	La-132	2,5E+01
Ag-110m	2,5E+00	Sb-120	7,7E+00	I-135 (I ₂)	7,5E-01	La-135	3,5E+02

Fortsetzung Tabelle 3-9

Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg
La-137	2,4E+03	Sm-141	7,6E+00	Dy-155	7,6E+01	Lu-176m	9,2E+01
La-138	8,7E+01	Sm-141m	9,5E+00	Dy-157	1,6E+02	Lu-177	3,1E+01
La-140	5,5E+00	Sm-142	3,2E+01	Dy-159	1,8E+02	Lu-177m	1,0E+01
La-141	2,5E+01	Sm-145	1,5E+02	Dy-165	1,9E+02	Lu-178	6,4E+01
La-142	1,8E+01	Sm-146	5,8E+00	Dy-166	7,5E+00	Lu-178m	1,9E+01
La-143	1,3E+01	Sm-151	7,6E+03	Ho-155	5,3E+01	Lu-179	6,1E+01
Ce-134	4,7E+00	Sm-153	1,7E+01	Ho-157	2,3E+01	Hf-170	1,7E+01
Ce-135	1,1E+01	Sm-155	6,2E+01	Ho-159	6,0E+01	Hf-172	8,3E+00
Ce-137	3,4E+02	Sm-156	2,7E+01	Ho-161	6,4E+02	Hf-173	5,0E+01
Ce-137m	1,5E+01	Eu-145	3,9E+01	Ho-162	8,0E+01	Hf-175	4,4E+00
Ce-139	6,9E+01	Eu-146	2,2E+01	Ho-162m	6,8E+01	Hf-177m	1,5E+01
Ce-141	1,2E+01	Eu-147	4,0E+01	Ho-164	1,7E+02	Hf-178m	2,0E+01
Ce-143	7,0E+00	Eu-148	1,5E+01	Ho-164m	2,4E+02	Hf-179m	9,8E-01
Ce-144	4,0E+00	Eu-149	1,5E+02	Ho-166	7,4E+00	Hf-180m	8,7E+01
Pr-136	7,6E+00	Eu-150	6,8E+01	Ho-166m	5,9E+01	Hf-181	1,0E+00
Pr-137	8,8E+01	Eu-152	8,8E+01	Ho-167	1,4E+02	Hf-182	3,1E+01
Pr-138m	2,5E+01	Eu-152m	1,7E+01	Er-161	7,3E+01	Hf-182m	3,2E+01
Pr-139	2,5E+02	Eu-154	7,3E+01	Er-165	6,9E+02	Hf-183	3,7E+01
Pr-142	7,5E+00	Eu-155	3,9E+02	Er-169	4,3E+01	Hf-184	1,9E+01
Pr-142m	8,0E+01	Eu-156	7,0E+00	Er-171	2,4E+01	Ta-172	1,5E+01
Pr-143	1,1E+01	Eu-157	1,6E+01	Er-172	1,3E+01	Ta-173	5,7E+01
Pr-144	4,0E+01	Eu-158	3,1E+01	Tm-162	1,7E+01	Ta-174	1,2E+02
Pr-145	2,5E+01	Gd-145	8,8E+00	Tm-166	3,3E+01	Ta-175	4,7E+01
Pr-147	1,5E+01	Gd-146	1,1E+01	Tm-167	3,2E+01	Ta-176	3,2E+01
Nd-136	2,4E+01	Gd-147	2,8E+01	Tm-170	8,9E+00	Ta-177	1,6E+02
Nd-138	1,8E+01	Gd-148	4,1E+00	Tm-171	4,4E+02	Ta-178	5,6E+01
Nd-139	5,4E+01	Gd-149	5,4E+01	Tm-172	8,4E+00	Ta-179	9,2E+01
Nd-139m	3,6E+01	Gd-151	7,3E+01	Tm-173	2,7E+01	Ta-180m	1,6E+02
Nd-141	6,7E+02	Gd-153	8,7E+01	Tm-175	1,5E+01	Ta-182	1,0E+00
Nd-147	1,5E+01	Gd-159	1,2E+01	Yb-162	2,5E+01	Ta-182m	2,2E+01
Nd-149	8,7E+01	Tb-147	2,1E+01	Yb-166	2,2E+01	Ta-183	2,3E+00
Nd-151	1,3E+01	Tb-149	7,5E+00	Yb-167	4,1E+01	Ta-184	1,4E+01
Pm-141	2,6E+01	Tb-150	8,4E+01	Yb-169	1,5E+01	Ta-185	6,9E+01
Pm-143	2,5E+02	Tb-151	5,0E+01	Yb-175	3,5E+01	Ta-186	7,1E+00
Pm-144	8,6E+01	Tb-153	7,5E+01	Yb-177	1,5E+02	W-176	3,8E+01
Pm-145	4,8E+03	Tb-154	2,6E+01	Yb-178	1,0E+02	W-177	5,9E+01
Pm-146	1,1E+02	Tb-155	1,1E+02	Lu-169	4,6E+01	W-178	1,8E+01
Pm-147	2,5E+02	Tb-156	2,6E+01	Lu-170	2,7E+01	W-179	2,8E+02
Pm-148	6,4E+00	Tb-156m	5,0E+01	Lu-171	3,8E+01	W-181	8,1E+01
Pm-148m	8,1E+00	Tb-157	2,3E+04	Lu-172	2,4E+01	W-185	7,1E+00
Pm-149	1,3E+01	Tb-158	1,3E+02	Lu-173	1,8E+02	W-187	8,8E+00
Pm-150	3,8E+01	Tb-160	7,1E+00	Lu-174	3,5E+02	W-188	1,3E+00
Pm-151	1,6E+01	Tb-161	2,3E+01	Lu-174m	2,4E+01	Re-177	1,5E+01

Fortsetzung Tabelle 3-9

Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg
Re-178	1,1E+01	Pt-197	4,6E+00	Pb-198	3,6E+01	Ac-228	3,6E+00
Re-181	7,3E+00	Pt-197m	7,9E+01	Pb-199	3,4E+01	Th-226	6,7E-02
Re-182	4,4E+00	Pt-199	3,8E+01	Pb-200	3,1E+01	Th-227	8,3E-02
Re-184	7,5E+00	Pt-200	1,7E+00	Pb-201	5,6E+01	Th-228	1,5E-01
Re-184m	5,9E+00	Au-193	5,6E+01	Pb-202	1,1E+02	Th-229	8,6E-01
Re-186	3,0E+00	Au-194	4,7E+01	Pb-202m	3,3E+01	Th-230	2,1E+00
Re-186m	3,4E+01	Au-195	7,2E+01	Pb-203	7,9E+01	Th-231	2,0E+01
Re-187	1,6E+04	Au-198	1,1E+01	Pb-205	3,5E+03	Th-232	1,9E+00
Re-188	1,5E+00	Au-198m	8,3E+00	Pb-209	2,2E+02	Th-234	2,9E+00
Re-188m	2,8E+01	Au-199	2,6E+01	Pb-210	4,3E-01	Pa-227	5,0E-02
Re-189	3,3E+00	Au-200	3,6E+01	Pb-211	5,2E-01	Pa-228	3,2E+00
Os-180	1,4E+01	Au-200m	8,1E+00	Pb-212	2,1E-01	Pa-230	8,3E-01
Os-181	3,1E+01	Au-201	4,9E+01	Pb-214	3,6E-01	Pa-231	4,0E-01
Os-182	5,0E+00	Hg-193 (org.)	1,7E+02	Bi-200	1,1E+01	Pa-232	1,4E+01
Os-185	6,0E+00	Hg-193 (anorg.)	3,1E+01	Bi-201	2,8E+01	Pa-233	1,1E+01
Os-189m	9,9E+01	Hg-193m (org.)	4,7E+01	Bi-202	2,3E+01	Pa-234	2,1E+01
Os-191	1,6E+00	Hg-193m (anorg.)	1,1E+01	Bi-203	1,7E+01	U-230	4,4E-02
Os-191m	2,0E+01	Hg-194 (org.)	1,0E-07	Bi-205	2,2E+01	U-231	3,6E+01
Os-193	2,2E+00	Hg-194 (anorg.)	7,2E+01	Bi-206	1,1E+01	U-232	2,5E+00
Os-194	6,1E+00	Hg-195 (org.)	1,9E+02	Bi-207	6,4E+01	U-233	2,9E+01
Ir-182	8,6E+00	Hg-195 (anorg.)	4,8E+01	Bi-210	6,6E+00	U-234	3,0E+01
Ir-184	2,7E+01	Hg-195m (org.)	6,9E+01	Bi-210m	5,0E+00	U-235	3,2E+01
Ir-185	1,1E+01	Hg-195m (anorg.)	8,0E+00	Bi-212	2,6E-01	U-236	3,2E+01
Ir-186	8,6E+00	Hg-197 (org.)	1,4E+02	Bi-213	1,6E-01	U-237	1,4E+01
Ir-187	2,8E+01	Hg-197 (anorg.)	2,2E+01	Bi-214	1,1E-01	U-238	3,4E+01
Ir-188	6,8E+00	Hg-197m (org.)	8,7E+01	Po-203	1,3E+01	U-239	6,6E+01
Ir-189	1,2E+01	Hg-197m (anorg.)	6,4E+00	Po-205	2,4E+01	U-240	5,4E+00
Ir-190	3,8E+00	Hg-199m (org.)	8,2E+01	Po-207	3,4E+01	Np-232	1,2E+01
Ir-190m	2,2E+01	Hg-199m (anorg.)	2,8E+01	Po-210	2,9E-03	Np-233	2,2E+02
Ir-192	4,4E+00	Hg-203 (org.)	1,0E+00	At-207	8,4E+00	Np-234	3,3E+01
Ir-192m	9,8E+01	Hg-203 (anorg.)	2,1E+00	At-211	3,7E-02	Np-235	5,6E+02
Ir-193m	8,8E+00	Tl-194	3,6E+01	Fr-222	4,8E-02	Np-236	4,3E+01
Ir-194	1,4E+00	Tl-194m	1,2E+01	Fr-223	2,5E+00	Np-237	4,2E+00
Ir-194m	8,1E+00	Tl-195	3,8E+01	Ra-223	5,8E-03	Np-238	7,9E+00
Ir-195	6,6E+01	Tl-197	1,1E+02	Ra-224	8,0E-03	Np-239	1,4E+01
Ir-195m	1,4E+01	Tl-198	3,0E+01	Ra-225	4,7E-03	Np-240	2,7E+01
Pt-186	3,7E+01	Tl-198m	3,1E+01	Ra-226	5,9E-01	Pu-234	8,7E+00
Pt-188	2,7E+00	Tl-199	9,8E+01	Ra-227	2,3E+01	Pu-235	1,6E+02
Pt-189	2,6E+01	Tl-200	2,7E+01	Ra-228	2,7E-02	Pu-236	5,1E-01
Pt-191	7,9E+00	Tl-201	6,9E+01	Ac-224	1,2E+00	Pu-237	1,1E+02
Pt-193	1,6E+03	Tl-202	1,5E+01	Ac-225	1,7E-01	Pu-238	3,2E+00
Pt-193m	4,1E+00	Tl-204	1,5E+01	Ac-226	2,8E-01	Pu-239	3,6E+00
Pt-195m	3,0E+00	Pb-195m	8,8E+00	Ac-227	1,4E-01	Pu-240	3,6E+00

Fortsetzung Tabelle 3-9

Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg	Nuklid	Bq/kg
Pu-241	8,4E+01	Am-244m	4,0E+01	Cm-250	1,5E-01	Es-250	1,5E+01
Pu-242	3,7E+00	Am-245	1,6E+02	Bk-245	3,2E+01	Es-251	2,6E+01
Pu-243	1,1E+02	Am-246	3,0E+01	Bk-246	5,3E+01	Es-253	2,6E-01
Pu-244	3,8E+00	Am-246m	2,1E+01	Bk-247	9,6E-01	Es-254	2,2E-01
Pu-245	8,6E+00	Cm-238	8,2E+00	Bk-249	1,3E+01	Es-254m	6,3E-01
Pu-246	5,6E+00	Cm-240	2,7E-01	Bk-250	1,5E+01	Fm-252	7,0E-01
Am-237	9,8E+01	Cm-241	1,3E+01	Cf-244	9,0E-02	Fm-253	1,6E+00
Am-238	5,8E+01	Cm-242	2,6E-01	Cf-246	6,9E-01	Fm-254	3,9E-01
Am-239	2,6E+01	Cm-243	2,0E+00	Cf-248	2,4E-01	Fm-255	6,4E-01
Am-240	3,1E+01	Cm-244	1,7E+00	Cf-249	8,9E-01	Fm-257	1,5E-01
Am-241	3,0E+00	Cm-245	3,1E+00	Cf-250	6,3E-01	Md-257	1,8E+00
Am-242	1,0E+01	Cm-246	3,1E+00	Cf-251	9,1E-01	Md-258	1,9E-01
Am-242m	3,3E+00	Cm-247	3,4E+00	Cf-252	1,8E-01		
Am-243	3,2E+00	Cm-248	8,5E-01	Cf-253	5,0E-01		
Am-244	1,7E+01	Cm-249	1,1E+02	Cf-254	1,2E-02		

3.2.3 Begrenzung der Aktivitätskonzentration in Wasser

Entsprechend der in den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 beschriebenen Vorgehensweise zur Berechnung der Dosis der Referenzpersonen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in Fließgewässer und in das Meer werden die höchsten Aktivitätskonzentrationen in Wasser abgeleitet. Die entsprechenden Aktivitätskonzentrationen sind in Tabelle 3-10 aufgelistet.

Tabelle 3-10: Ermittelte maximal zulässige Aktivitätskonzentration in Wasser eines Fließgewässers (I) und in marinen Gewässern (II)

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
H-3	1,5E+03	6,7E+04	Mn-51	1,3E+02	1,1E+00	Ga-72	1,2E-01	5,6E-01
Be-7	2,9E+02	2,3E+03	Mn-52	1,1E+01	8,1E-02	Ga-73	4,6E-01	2,1E+00
Be-10	2,2E+00	2,2E+01	Mn-52m	1,6E+02	1,4E+00	Ge-66	3,2E+00	5,4E-03
C-11	3,8E+00	5,1E-01	Mn-53	8,4E+01	2,4E+00	Ge-67	1,4E+00	2,3E-03
C-14	1,3E+00	1,8E-01	Mn-54	1,1E+01	2,2E-01	Ge-68	4,2E-02	1,2E-04
F-18	4,8E+02	2,5E+01	Mn-56	5,4E+01	4,6E-01	Ge-69	8,4E-01	1,4E-03
Na-22	4,5E-01	4,4E+02	Fe-52	9,3E+00	3,8E-03	Ge-71	7,0E+00	1,3E-02
Na-24	2,6E+01	4,2E+03	Fe-55	8,2E+00	5,0E-03	Ge-75	2,1E+00	3,5E-03
Mg-28	3,7E+00	1,1E+02	Fe-59	4,4E+00	3,5E-03	Ge-77	8,4E-01	1,4E-03
Al-26	1,6E-01	1,3E-01	Fe-60	5,6E-02	3,2E-05	Ge-78	1,2E+00	2,0E-03
Si-31	8,2E+01	4,9E+04	Co-55	1,3E+01	2,0E-01	As-69	5,3E+01	8,1E+00
Si-32	6,2E+00	6,6E+03	Co-56	5,1E+00	1,0E-01	As-70	3,2E+01	5,0E+00
P-32	1,0E-01	3,9E-03	Co-57	3,7E+01	9,3E-01	As-71	6,4E+00	1,2E+00
P-33	1,7E+00	6,9E-02	Co-58	1,8E+01	3,5E-01	As-72	1,5E+00	2,6E-01
S-35 (anorg.)	8,8E+00	5,5E+03	Co-58m	5,2E+02	8,1E+00	As-73	7,1E+00	1,4E+00
S-35 (org.)	1,4E+00	9,2E+02	Co-60	8,5E-01	5,6E-02	As-74	2,0E+00	3,6E-01
Cl-36	1,3E+00	2,5E+04	Co-60m	5,4E+03	8,4E+01	As-76	1,5E+00	2,6E-01
Cl-38	4,9E+01	7,9E+04	Co-61	2,0E+02	3,2E+00	As-77	5,1E+00	9,1E-01
Cl-39	7,1E+01	1,2E+05	Co-62m	2,3E+02	3,5E+00	As-78	1,9E+01	3,0E+00
K-42	1,1E+00	1,6E+03	Ni-56	1,2E+01	5,8E-01	Se-70	2,7E+01	3,1E-01
K-43	3,5E+00	5,2E+03	Ni-57	9,0E+00	3,5E-01	Se-73	2,7E+01	3,5E-01
K-44	3,1E+00	4,5E+03	Ni-59	4,0E+01	4,2E+00	Se-73m	1,2E+02	1,4E+00
K-45	4,9E+00	7,2E+03	Ni-63	1,7E+01	1,7E+00	Se-75	7,1E-01	2,6E-02
Ca-41	1,4E+00	2,3E+02	Ni-65	4,7E+01	1,7E+00	Se-79	2,5E-02	6,7E-03
Ca-45	2,2E-01	2,9E+01	Ni-66	1,2E+00	4,6E-02	Se-81	7,1E+01	7,9E-01
Ca-47	6,1E-01	6,8E+01	Cu-60	4,3E+02	8,6E-01	Se-81m	4,5E+01	5,0E-01
Sc-43	8,7E+00	4,4E-01	Cu-61	4,6E+02	1,1E+00	Se-83	5,6E+01	6,3E-01
Sc-44	4,5E+00	2,3E-01	Cu-64	3,2E+02	8,1E-01	Br-74	3,7E+01	7,9E+00
Sc-44m	3,7E-01	1,9E-02	Cu-67	7,4E+01	2,1E-01	Br-74m	2,3E+01	5,1E+00
Sc-46	9,6E-01	5,3E-02	Zn-62	3,3E+00	1,3E-02	Br-75	4,4E+01	9,3E+00
Sc-47	1,4E+00	7,1E-02	Zn-63	3,2E+01	1,0E-01	Br-76	1,6E+01	4,3E+00
Sc-48	9,5E-01	4,9E-02	Zn-65	7,2E-01	5,4E-03	Br-77	7,5E+01	2,5E+01
Sc-49	1,7E+01	7,0E-01	Zn-69	8,0E+01	2,6E-01	Br-80	8,5E+01	1,8E+01
Ti-44	2,2E-01	6,4E-02	Zn-69m	7,5E+00	3,0E-02	Br-80m	3,3E+01	7,2E+00
Ti-45	2,6E+01	6,6E+00	Zn-71m	1,6E+01	6,4E-02	Br-82	1,5E+01	5,0E+00
V-47	6,6E+01	2,7E+02	Zn-72	1,8E+00	7,5E-03	Br-83	7,2E+01	1,5E+01
V-48	2,5E+00	9,4E+00	Ga-65	3,2E+00	1,6E+01	Br-84	3,2E+01	6,8E+00
V-49	9,7E+01	4,9E+02	Ga-66	1,2E-01	5,2E-01	Rb-79	6,3E+00	4,3E+01
Cr-48	4,5E+01	4,3E+00	Ga-67	5,0E-01	2,3E+00	Rb-81	9,4E+00	6,4E+01
Cr-49	8,8E+01	7,0E+00	Ga-68	1,5E+00	7,6E+00	Rb-81m	4,0E+01	2,7E+02
Cr-51	1,1E+02	1,2E+01	Ga-70	3,5E+00	1,7E+01	Rb-82m	9,1E+00	6,2E+01

Fortsetzung Tabelle 3-10

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
Rb-83	6,3E-01	4,5E+00	Nb-95m	5,3E+00	1,9E+00	Pd-101	2,1E+01	1,3E+01
Rb-84	3,0E-01	2,1E+00	Nb-96	5,9E+00	2,0E+00	Pd-103	3,4E+00	2,3E+00
Rb-86	1,6E-01	1,1E+00	Nb-97	1,1E+02	3,8E+01	Pd-107	1,2E+01	1,1E+01
Rb-87	1,8E-01	2,2E+00	Nb-98	6,0E+01	2,1E+01	Pd-109	1,7E+00	1,1E+00
Rb-88	3,1E+00	2,1E+01	Mo-90	3,1E+02	2,1E+02	Ag-102	1,3E+02	2,5E-01
Rb-89	6,6E+00	4,5E+01	Mo-93	1,4E+00	2,9E+00	Ag-103	1,5E+02	3,2E-01
Sr-80	9,4E+01	5,2E+02	Mo-93m	6,8E+02	4,2E+02	Ag-104	1,9E+02	4,3E-01
Sr-81	3,4E+02	1,8E+03	Mo-99	6,7E+01	4,6E+01	Ag-104m	1,1E+02	2,2E-01
Sr-82	2,0E+00	1,5E+01	Mo-101	5,7E+02	4,1E+02	Ag-105	4,8E+00	4,1E-02
Sr-83	5,4E+01	3,9E+02	Tc-93	3,6E+02	4,0E+00	Ag-106	1,4E+02	2,8E-01
Sr-85	2,0E+01	2,2E+02	Tc-93m	3,6E+02	4,0E+00	Ag-106m	2,8E+00	1,4E-02
Sr-85m	9,4E+03	5,5E+04	Tc-94	7,4E+01	8,1E-01	Ag-108m	2,8E-01	1,1E-02
Sr-87m	1,4E+03	9,0E+03	Tc-94m	4,8E+01	5,2E-01	Ag-110m	6,7E-01	8,8E-03
Sr-89	2,3E+00	2,3E+01	Tc-95	1,2E+02	1,3E+00	Ag-111	1,0E+00	5,1E-03
Sr-90	6,9E-02	1,4E+00	Tc-95m	1,1E+01	2,9E-01	Ag-112	1,1E+01	2,7E-02
Sr-91	4,5E+01	3,0E+02	Tc-96	1,8E+01	2,1E-01	Ag-115	8,1E+01	1,6E-01
Sr-92	5,6E+01	3,9E+02	Tc-96m	9,1E+02	9,9E+00	Cd-104	2,3E+02	8,5E-01
Y-86	4,6E+01	2,9E+00	Tc-97m	3,6E+00	1,1E-01	Cd-107	8,6E+01	2,9E-01
Y-86m	7,9E+02	5,0E+01	Tc-97	1,4E+01	9,9E-01	Cd-109	7,9E-01	3,8E-03
Y-87	4,9E+01	3,2E+00	Tc-98	6,1E-01	4,5E-02	Cd-113	4,7E-02	4,1E-04
Y-88	1,4E+01	1,6E+00	Tc-99	1,2E+00	8,5E-02	Cd-113m	6,7E-02	4,6E-04
Y-90	5,8E+00	3,8E-01	Tc-99m	3,1E+02	3,3E+00	Cd-115	2,5E+00	8,5E-03
Y-90m	1,1E+02	7,4E+00	Tc-101	2,1E+02	2,3E+00	Cd-115m	1,0E+00	3,8E-03
Y-91	3,7E+00	4,2E-01	Tc-104	5,1E+01	5,6E-01	Cd-117	2,0E+01	6,8E-02
Y-91m	5,6E+03	3,4E+02	Ru-94	1,8E+02	5,2E+01	Cd-117m	2,5E+01	8,5E-02
Y-92	5,4E+01	3,5E+00	Ru-97	9,0E+01	2,4E+01	In-109	3,3E+00	4,6E+00
Y-93	2,1E+01	1,4E+00	Ru-103	9,8E+00	3,4E+00	In-110	1,7E+00	2,9E+00
Y-94	3,1E+02	2,2E+01	Ru-105	4,8E+01	1,3E+01	In-111	5,0E-01	7,3E-01
Y-95	5,4E+02	3,8E+01	Ru-106	6,6E-01	3,0E-01	In-112	1,1E+01	1,9E+01
Zr-86	7,4E+00	9,6E-01	Rh-99	2,7E+00	1,6E+00	In-113m	7,0E+00	1,1E+01
Zr-88	1,3E+01	2,5E+00	Rh-99m	3,8E+01	2,1E+01	In-114m	1,9E-02	3,0E-02
Zr-89	7,8E+00	1,0E+00	Rh-100	3,8E+00	2,1E+00	In-115m	1,4E+00	2,3E+00
Zr-93	2,6E+00	3,1E-01	Rh-101	2,6E+00	1,9E+00	In-116m	3,2E+00	4,9E+00
Zr-95	4,4E+00	7,7E-01	Rh-101m	6,8E+00	3,9E+00	In-117	5,0E+00	7,8E+00
Zr-97	2,2E+00	3,3E-01	Rh-102	6,5E-01	5,8E-01	In-117m	1,3E+00	2,2E+00
Nb-88	9,1E+01	3,0E+01	Rh-102m	7,3E-01	5,1E-01	In-119m	2,3E+00	3,7E+00
Nb-89	2,8E+01	9,4E+00	Rh-103m	2,8E+02	1,6E+02	Sn-110	1,1E+00	3,2E-03
Nb-90	5,8E+00	2,0E+00	Rh-105	2,2E+00	1,2E+00	Sn-111	2,2E+01	6,4E-02
Nb-93m	4,8E+00	8,2E+00	Rh-106m	1,5E+01	8,7E+00	Sn-113	3,3E-01	1,0E-03
Nb-94	5,8E-01	8,0E-02	Rh-107	3,9E+01	2,2E+01	Sn-117m	3,4E-01	1,0E-03
Nb-95	4,8E+00	3,4E+00	Pd-100	1,5E+00	9,5E-01	Sn-119m	6,1E-01	1,9E-03

Fortsetzung Tabelle 3-10

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
Sn-121	1,2E+00	3,4E-03	Te-134	2,1E+01	1,5E+00	La-131	4,4E+02	2,4E+01
Sn-121m	4,8E-01	1,8E-03	I-120	1,4E+01	3,8E-01	La-132	3,3E+01	1,7E+00
Sn-123	9,8E-02	3,1E-04	I-120m	4,0E+01	1,1E+00	La-135	4,4E+02	2,1E+01
Sn-123m	1,0E+01	3,1E-02	I-121	5,9E+01	1,6E+00	La-137	1,9E+01	2,7E+00
Sn-125	7,3E-02	2,2E-04	I-123	1,2E+01	3,5E-01	La-138	7,0E-01	1,0E-01
Sn-126	4,6E-02	1,9E-04	I-124	2,0E-01	5,9E-03	La-140	4,4E+00	2,3E-01
Sn-127	3,1E+00	9,3E-03	I-125	2,7E-01	1,4E-02	La-141	2,8E+01	1,5E+00
Sn-128	3,7E+00	1,1E-02	I-126	1,0E-01	3,5E-03	La-142	1,0E+02	5,1E+00
Sb-115	4,7E+02	5,0E+01	I-128	1,3E+02	3,5E+00	La-143	2,0E+02	1,1E+01
Sb-116	4,3E+02	4,5E+01	I-129	3,5E-02	3,8E-03	Ce-134	1,8E+00	2,2E-01
Sb-116m	3,1E+02	3,3E+01	I-130	1,3E+00	3,7E-02	Ce-135	1,1E+01	1,3E+00
Sb-117	8,8E+02	9,4E+01	I-131	1,2E-01	3,8E-03	Ce-137	3,7E+02	4,0E+01
Sb-118m	1,0E+02	1,1E+01	I-132	1,3E+01	3,6E-01	Ce-137m	8,9E+00	1,0E+00
Sb-119	8,5E+01	9,4E+00	I-132m	1,4E+01	3,7E-01	Ce-139	1,7E+01	2,6E+00
Sb-120	1,3E+01	1,5E+00	I-133	5,3E-01	1,5E-02	Ce-141	5,3E+00	6,8E-01
Sb-122	3,4E+00	3,8E-01	I-134	8,2E+01	2,3E+00	Ce-143	4,4E+00	5,0E-01
Sb-124	2,0E+00	3,3E-01	I-135	2,7E+00	7,5E-02	Ce-144	5,5E-01	8,7E-02
Sb-124m	1,4E+03	1,5E+02	Cs-125	1,6E+01	8,1E+01	Pr-136	4,9E+01	1,7E+01
Sb-125	5,4E+00	1,2E+00	Cs-127	6,5E+01	3,2E+02	Pr-137	6,5E+01	2,4E+01
Sb-126	3,6E+00	4,5E-01	Cs-129	3,6E+01	1,8E+02	Pr-138m	2,6E+01	7,8E+00
Sb-126m	2,8E+02	2,9E+01	Cs-130	1,8E+01	9,1E+01	Pr-139	6,0E+01	2,1E+01
Sb-127	3,3E+00	3,8E-01	Cs-131	3,3E+01	1,7E+02	Pr-142	8,4E-01	3,0E-01
Sb-128	1,9E+01	2,0E+00	Cs-132	5,1E+00	2,5E+01	Pr-142m	6,5E+01	2,3E+01
Sb-129	2,2E+01	2,4E+00	Cs-134	2,1E-01	1,1E+00	Pr-143	7,1E-01	2,6E-01
Sb-130	1,4E+02	1,5E+01	Cs-134m	3,4E+01	1,7E+02	Pr-144	2,8E+01	9,9E+00
Sb-131	8,0E+01	8,5E+00	Cs-135	2,2E+00	1,2E+01	Pr-145	3,6E+00	1,3E+00
Te-116	2,1E+01	1,5E+00	Cs-135m	5,9E+01	3,0E+02	Pr-147	4,6E+01	1,7E+01
Te-121	9,2E+00	7,7E-01	Cs-136	9,6E-01	4,9E+00	Nd-136	2,4E+01	8,2E+00
Te-121m	2,3E-01	3,1E-02	Cs-137	2,9E-01	1,6E+00	Nd-138	2,4E+00	8,7E-01
Te-123	1,7E-02	2,8E-02	Cs-138	5,8E+00	2,9E+01	Nd-139	1,0E+02	3,7E+01
Te-123m	3,0E-01	3,9E-02	Ba-126	3,3E+01	2,4E+02	Nd-139m	9,6E+00	3,1E+00
Te-125m	6,1E-01	6,6E-02	Ba-128	1,5E+00	1,1E+01	Nd-141	3,0E+02	9,9E+01
Te-127	1,5E+01	1,1E+00	Ba-131	1,4E+01	1,1E+02	Nd-147	8,4E-01	3,0E-01
Te-127m	1,1E-01	1,4E-02	Ba-131m	1,2E+03	8,5E+03	Nd-149	1,8E+01	6,3E+00
Te-129	2,6E+01	1,8E+00	Ba-133	1,8E+00	9,9E+00	Nd-151	6,0E+01	2,2E+01
Te-129m	2,0E-01	1,9E-02	Ba-133m	7,5E+00	5,5E+01	Pm-141	4,4E+01	1,3E+01
Te-131	1,7E+01	1,2E+00	Ba-135m	9,6E+00	7,1E+01	Pm-143	1,0E+01	2,6E+00
Te-131m	5,0E-01	3,6E-02	Ba-139	5,8E+01	4,3E+02	Pm-144	2,7E+00	6,5E-01
Te-132	2,0E-01	1,4E-02	Ba-140	1,4E+00	1,1E+01	Pm-145	1,1E+01	3,4E+00
Te-133	1,4E+01	9,7E-01	Ba-141	1,1E+02	7,9E+02	Pm-146	1,4E+00	4,4E-01
Te-133m	3,3E+00	2,4E-01	Ba-142	2,1E+02	1,6E+03	Pm-147	3,1E+00	9,9E-01

Fortsetzung Tabelle 3-10

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
Pm-148	3,6E-01	1,0E-01	Tb-155	6,5E+00	2,2E+00	Yb-177	2,5E+01	8,8E+00
Pm-148m	8,8E-01	2,4E-01	Tb-156	1,7E+00	5,4E-01	Yb-178	1,7E+01	6,1E+00
Pm-149	9,3E-01	2,7E-01	Tb-156m	2,5E+01	8,2E+00	Lu-169	4,9E+00	1,6E+00
Pm-150	7,9E+00	2,1E+00	Tb-157	2,9E+01	1,1E+01	Lu-170	2,3E+00	7,2E-01
Pm-151	1,6E+00	4,6E-01	Tb-158	5,6E-01	1,7E-01	Lu-171	2,2E+00	7,3E-01
Sm-141	8,2E+02	1,0E+01	Tb-160	6,8E-01	2,5E-01	Lu-172	1,5E+00	4,8E-01
Sm-141m	5,6E+02	6,7E+00	Tb-161	1,2E+00	4,3E-01	Lu-173	4,5E+00	1,6E+00
Sm-142	2,2E+02	2,7E+00	Dy-155	5,6E+01	4,6E+00	Lu-174	3,9E+00	1,4E+00
Sm-145	4,0E+01	1,3E+00	Dy-157	1,4E+02	1,0E+01	Lu-174m	1,6E+00	6,0E-01
Sm-146	5,4E-02	4,4E-03	Dy-159	2,6E+01	2,8E+00	Lu-176m	9,0E+00	3,2E+00
Sm-151	7,0E+01	2,5E+00	Dy-165	4,5E+01	4,3E+00	Lu-177	1,7E+00	5,8E-01
Sm-153	2,6E+01	3,1E-01	Dy-166	1,1E+00	1,1E-01	Lu-177m	6,1E-01	2,3E-01
Sm-155	9,8E+02	1,2E+01	Ho-155	6,5E+01	2,4E+01	Lu-178	3,1E+01	1,2E+01
Sm-156	1,1E+02	1,3E+00	Ho-157	3,7E+02	1,3E+02	Lu-178m	4,4E+01	1,5E+01
Eu-145	1,7E+01	7,0E-01	Ho-159	2,9E+02	9,9E+01	Lu-179	7,1E+00	2,5E+00
Eu-146	1,0E+01	4,3E-01	Ho-161	1,7E+02	6,0E+01	Hf-170	1,4E+00	8,0E-01
Eu-147	1,6E+01	8,1E-01	Ho-162	5,2E+02	1,8E+02	Hf-172	3,6E-01	2,7E-01
Eu-148	7,4E+00	4,0E-01	Ho-162m	1,1E+02	3,8E+01	Hf-173	3,0E+00	1,7E+00
Eu-149	5,0E+01	2,9E+00	Ho-164	1,6E+02	5,8E+01	Hf-175	1,1E+00	7,5E-01
Eu-150	4,4E-01	1,2E-01	Ho-164m	1,1E+02	4,0E+01	Hf-177m	1,0E+01	6,3E+00
Eu-152	1,0E+00	2,2E-01	Ho-166	7,1E-01	2,6E-01	Hf-178m	1,0E-01	6,4E-02
Eu-152m	1,5E+01	7,2E-01	Ho-166m	2,3E-01	6,9E-02	Hf-179m	3,3E-01	2,1E-01
Eu-154	1,3E+00	1,4E-01	Ho-167	2,2E+01	7,7E+00	Hf-180m	5,0E+00	2,8E+00
Eu-155	9,7E+00	7,1E-01	Er-161	3,3E+01	1,0E+01	Hf-181	3,1E-01	2,1E-01
Eu-156	2,2E+00	1,1E-01	Er-165	1,2E+02	4,1E+01	Hf-182	9,6E-02	6,1E-02
Eu-157	9,9E+00	5,1E-01	Er-169	2,3E+00	8,2E-01	Hf-182m	2,0E+01	1,3E+01
Eu-158	8,7E+01	4,5E+00	Er-171	4,4E+00	1,6E+00	Hf-183	1,2E+01	7,4E+00
Gd-145	4,4E+01	1,0E+01	Er-172	9,8E-01	3,4E-01	Hf-184	1,2E+00	7,2E-01
Gd-146	1,2E+00	2,9E-01	Tm-162	6,5E+01	1,5E+01	Ta-172	1,3E+02	1,2E+01
Gd-147	3,9E+00	8,0E-01	Tm-166	1,0E+01	2,1E+00	Ta-173	3,5E+01	3,0E+00
Gd-148	1,2E-02	3,7E-03	Tm-167	1,7E+00	4,0E-01	Ta-174	1,4E+02	1,3E+01
Gd-149	3,1E+00	7,1E-01	Tm-170	6,1E-01	1,5E-01	Ta-175	5,1E+01	3,9E+00
Gd-151	5,3E+00	1,3E+00	Tm-171	7,4E+00	1,9E+00	Ta-176	3,4E+01	2,5E+00
Gd-153	3,8E+00	9,6E-01	Tm-172	6,0E-01	1,4E-01	Ta-177	4,2E+01	3,6E+00
Gd-159	2,3E+00	5,5E-01	Tm-173	5,2E+00	1,3E+00	Ta-178	1,4E+02	1,1E+01
Tb-147	1,9E+01	6,6E+00	Tm-175	6,0E+01	1,5E+01	Ta-179	9,2E+00	5,7E+00
Tb-149	8,5E+00	2,9E+00	Yb-162	9,4E+01	3,3E+01	Ta-180m	1,1E+02	9,6E+00
Tb-150	7,9E+00	2,7E+00	Yb-166	1,7E+00	5,6E-01	Ta-182	5,2E-01	2,5E-01
Tb-151	6,5E+00	2,2E+00	Yb-167	2,9E+02	1,1E+02	Ta-182m	4,8E+02	4,4E+01
Tb-153	5,6E+00	1,9E+00	Yb-169	1,5E+00	5,4E-01	Ta-183	2,4E+00	2,3E-01
Tb-154	4,4E+00	1,4E+00	Yb-175	2,1E+00	7,4E-01	Ta-184	1,0E+01	8,5E-01

Fortsetzung Tabelle 3-10

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
Ta-185	8,8E+01	8,6E+00	Ir-192m	4,2E-01	2,3E-01
Ta-186	1,7E+02	1,6E+01	Ir-194	8,1E-01	2,6E+00
W-176	2,3E+01	2,9E+01	Ir-194m	7,6E-01	2,8E+00
W-177	4,4E+01	5,6E+01	Ir-195	1,9E+01	5,9E+01
W-178	3,9E+00	5,2E+00	Ir-195m	7,6E+00	2,4E+01
W-179	3,1E+02	3,9E+02	Pt-186	2,2E+01	7,2E+00
W-181	1,1E+01	1,7E+01	Pt-188	1,7E+00	6,0E-01
W-185	1,2E+00	1,9E+00	Pt-189	1,6E+01	5,7E+00
W-187	1,5E+00	2,0E+00	Pt-191	3,9E+00	1,4E+00
W-188	2,3E-01	3,5E-01	Pt-193	1,1E+01	9,3E+00
Re-177	1,5E+02	1,7E+00	Pt-193m	1,9E+00	6,9E-01
Re-178	1,2E+02	1,3E+00	Pt-195m	1,4E+00	5,1E-01
Re-181	1,2E+01	1,3E-01	Pt-197	2,7E+00	9,9E-01
Re-182	5,0E+00	5,9E-02	Pt-197m	2,4E+01	8,7E+00
Re-184	5,8E+00	9,2E-02	Pt-199	4,2E+01	1,5E+01
Re-184m	1,8E+00	3,9E-02	Pt-200	1,0E+00	3,7E-01
Re-186	3,1E+00	3,7E-02	Au-193	2,0E+02	3,9E+00
Re-186m	2,7E-01	1,9E-02	Au-194	1,1E+02	1,9E+00
Re-187	1,3E+02	9,2E+00	Au-195	3,3E+01	1,4E+00
Re-188	2,4E+00	2,8E-02	Au-198	1,8E+01	3,6E-01
Re-188m	1,3E+02	1,5E+00	Au-198m	1,5E+01	3,0E-01
Re-189	4,7E+00	5,4E-02	Au-199	3,9E+01	7,7E-01
Os-180	1,2E+02	4,1E+01	Au-200	4,3E+02	8,7E+00
Os-181	3,3E+01	1,1E+01	Au-200m	2,8E+01	5,3E-01
Os-182	2,9E+00	9,9E-01	Au-201	1,1E+03	2,2E+01
Os-185	2,8E+00	1,5E+00	Hg-193 (org.)	5,4E+01	6,5E-01
Os-189m	7,8E+01	2,9E+01	Hg-193m (org.)	2,4E+01	3,0E-01
Os-191	1,3E+00	5,7E-01	Hg-194 (org.)	5,3E-10	3,3E-11
Os-191m	1,2E+01	4,3E+00	Hg-195 (org.)	8,0E+01	9,7E-01
Os-193	1,2E+00	4,5E-01	Hg-195m (org.)	6,6E+00	8,3E-02
Os-194	1,5E-01	1,3E-01	Hg-197 (org.)	1,3E+01	1,6E-01
Ir-182	3,6E+01	9,4E+01	Hg-197m (org.)	9,9E+00	1,2E-01
Ir-184	1,4E+01	4,7E+01	Hg-199m (org.)	3,6E+01	4,3E-01
Ir-185	6,9E+00	2,2E+01	Hg-203 (org.)	5,1E-01	9,7E-03
Ir-186	5,1E+00	1,6E+01	Hg-193 (anorg.)	1,7E+01	2,3E-01
Ir-187	1,8E+01	5,6E+01	Hg-193m (anorg.)	3,5E+00	4,7E-02
Ir-188	3,8E+00	1,3E+01	Hg-194 (anorg.)	5,2E-01	4,1E-02
Ir-189	3,8E+00	1,3E+01	Hg-195 (anorg.)	1,5E+01	1,9E-01
Ir-190	1,2E+00	4,1E+00	Hg-195m (anorg.)	1,5E+00	1,9E-02
Ir-190m	2,4E+01	7,9E+01	Hg-197 (anorg.)	3,5E+00	4,3E-02
Ir-192	7,5E-01	2,6E+00	Hg-197m (anorg.)	1,7E+00	2,2E-02

Fortsetzung Tabelle 3-10

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
Hg-199m (anorg.)	3,6E+01	4,3E-01	Po-207	7,9E+01	1,1E+00
Hg-203 (anorg.)	1,0E+00	2,0E-02	Po-210	4,3E-04	7,6E-06
Tl-194	6,2E+00	3,9E+00	At-207	2,0E+01	1,2E+00
Tl-194m	9,1E-01	5,6E-01	At-211	4,0E-01	2,5E-02
Tl-195	1,8E+00	1,1E+00	Fr-222	1,6E+00	1,1E+01
Tl-197	2,5E+00	1,6E+00	Fr-223	4,6E-01	3,2E+00
Tl-198	1,5E+00	9,3E-01	Ra-223	1,5E-02	2,7E-03
Tl-198m	9,1E-01	5,6E-01	Ra-224	3,3E-02	5,2E-03
Tl-199	2,5E+00	1,6E+00	Ra-225	1,1E-02	2,1E-03
Tl-200	6,5E-01	4,1E-01	Ra-226	4,5E-03	2,2E-03
Tl-201	8,2E-01	5,1E-01	Ra-227	2,5E+02	3,4E+01
Tl-202	2,6E-01	1,6E-01	Ra-228	1,2E-03	6,7E-04
Tl-204	3,2E-02	2,1E-02	Ac-224	3,0E+01	1,7E+00
Pb-195m	6,7E+02	1,2E+00	Ac-225	5,7E-01	4,4E-02
Pb-198	3,8E+02	6,4E-01	Ac-226	1,9E+00	1,1E-01
Pb-199	8,0E+02	1,3E+00	Ac-227	2,1E-03	1,1E-03
Pb-200	5,7E+01	1,1E-01	Ac-228	9,1E+01	5,0E+00
Pb-201	2,1E+02	3,9E-01	Th-226	7,3E+01	2,6E+00
Pb-202	5,9E-01	1,8E-03	Th-227	9,5E-01	5,3E-02
Pb-202m	3,2E+02	5,2E-01	Th-228	2,3E-02	3,6E-03
Pb-203	8,6E+01	1,7E-01	Th-229	7,8E-03	8,1E-04
Pb-205	2,3E+01	4,5E-02	Th-230	1,9E-02	1,5E-03
Pb-209	3,5E+02	7,1E-01	Th-231	5,5E+01	2,0E+00
Pb-210	5,5E-03	1,2E-05	Th-232	1,7E-02	1,5E-03
Pb-211	7,6E+01	1,3E-01	Th-234	3,5E+00	1,5E-01
Pb-212	8,1E-01	1,4E-03	Pa-227	6,8E+01	1,8E+01
Pb-214	1,0E+02	1,8E-01	Pa-228	4,3E+01	1,0E+01
Bi-200	1,6E+03	1,2E+00	Pa-230	1,1E+01	6,7E+00
Bi-201	6,3E+02	4,8E-01	Pa-231	3,7E-03	3,6E-03
Bi-202	1,2E+03	8,2E-01	Pa-232	4,4E+01	1,0E+01
Bi-203	1,6E+02	1,1E-01	Pa-233	1,5E+01	5,1E+00
Bi-205	5,1E+01	4,9E-02	Pa-234	7,4E+01	1,7E+01
Bi-206	2,4E+01	2,0E-02	U-230	4,4E-01	7,4E-01
Bi-207	2,9E+00	2,4E-02	U-231	1,3E+02	1,2E+02
Bi-210	1,4E+01	1,3E-02	U-232	3,0E-02	5,5E-02
Bi-210m	4,9E-02	8,8E-04	U-233	2,8E-01	5,3E-01
Bi-212	1,8E+02	1,5E-01	U-234	2,9E-01	5,5E-01
Bi-213	2,2E+02	1,8E-01	U-235	3,1E-01	5,8E-01
Bi-214	3,4E+02	2,8E-01	U-236	3,1E-01	5,8E-01
Po-203	7,4E+01	1,1E+00	U-237	4,4E+01	4,1E+01
Po-205	9,0E+01	1,3E+00	U-238	3,3E-01	6,0E-01

Fortsetzung Tabelle 3-10

Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II	Nuklid	Bq/l I	Bq/l II
U-239	2,8E+03	2,3E+03	Am-238	2,5E+03	6,0E+01	Bk-246	8,5E+01	2,2E+00
U-240	4,8E+01	3,8E+01	Am-239	1,3E+02	3,3E+00	Bk-247	9,7E-03	8,4E-04
Np-232	7,3E+03	1,4E+03	Am-240	6,3E+01	1,6E+00	Bk-249	4,7E+00	3,6E-01
Np-233	3,3E+04	6,7E+03	Am-241	2,9E-02	1,8E-03	Bk-250	3,0E+02	7,6E+00
Np-234	7,7E+01	1,4E+01	Am-242	8,2E+01	2,2E+00	Cf-244	4,2E+02	1,1E+01
Np-235	1,6E+02	1,1E+02	Am-242m	3,4E-02	1,8E-03	Cf-246	6,2E+00	1,6E-01
Np-236	4,5E-01	2,2E-01	Am-243	3,0E-02	1,8E-03	Cf-248	8,7E-02	6,6E-03
Np-237	4,4E-02	3,9E-02	Am-244	7,8E+01	2,0E+00	Cf-249	9,3E-03	8,1E-04
Np-238	4,0E+01	8,1E+00	Am-244m	9,8E+02	2,7E+01	Cf-250	1,8E-02	1,5E-03
Np-239	4,0E+01	8,1E+00	Am-245	7,1E+02	1,9E+01	Cf-251	9,3E-03	8,1E-04
Np-240	8,8E+02	1,8E+02	Am-246	5,8E+02	1,6E+01	Cf-252	2,4E-02	1,9E-03
Pu-234	3,3E+02	5,6E+00	Am-246m	9,7E+02	2,6E+01	Cf-253	3,4E+00	9,0E-02
Pu-235	3,2E+04	5,6E+02	Cm-238	5,4E+02	1,9E+01	Cf-254	2,0E-02	9,7E-04
Pu-236	6,1E-02	7,0E-03	Cm-240	1,2E+00	6,1E-02	Es-250	3,9E+03	8,1E+01
Pu-237	1,8E+02	6,6E+00	Cm-241	1,8E+01	9,1E-01	Es-251	1,4E+02	3,5E+00
Pu-238	3,9E-02	2,5E-03	Cm-242	1,7E-01	1,8E-02	Es-253	2,7E+00	7,5E-02
Pu-239	3,6E-02	2,2E-03	Cm-243	3,2E-02	3,5E-03	Es-254	9,7E-02	7,1E-03
Pu-240	3,6E-02	2,2E-03	Cm-244	3,5E-02	4,4E-03	Es-254m	4,4E+00	1,2E-01
Pu-241	2,2E+00	1,1E-01	Cm-245	3,0E-02	2,3E-03	Fm-252	8,1E+00	2,2E-01
Pu-242	3,7E-02	2,3E-03	Cm-246	3,0E-02	2,4E-03	Fm-253	2,2E+01	5,0E-01
Pu-243	6,1E+02	1,0E+01	Cm-247	3,2E-02	2,5E-03	Fm-254	7,1E+01	1,9E+00
Pu-244	3,8E-02	2,4E-03	Cm-248	8,0E-03	6,4E-04	Fm-255	8,6E+00	2,2E-01
Pu-245	6,8E+01	1,2E+00	Cm-249	1,1E+03	4,3E+01	Fm-257	1,6E-01	9,7E-03
Pu-246	9,2E+00	1,8E-01	Cm-250	1,5E-03	1,1E-04	Md-257	2,2E+02	4,6E+00
Am-237	3,0E+03	7,9E+01	Bk-245	3,5E+01	9,3E-01	Md-258	3,4E-01	1,6E-02

4 Mögliche Strahlenexposition von Flora und Fauna

Aus den in Kapitel 2 abgeleiteten Dosiskonversionskoeffizienten für die Referenzorganismen und den in 3.2 ermittelten im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal möglichen Konzentrationen von Radionukliden in Luft, Boden, Fließgewässern und dem Meer lassen sich die maximal möglichen Dosen für die Referenzorganismen errechnen. Diese sind auftragsgemäß zunächst dahingehend zu beurteilen, ob eine Dosisrate von 10 $\mu\text{Gy/h}$ überschritten werden kann. Da die Dosiskonversionskoeffizienten in mGy/a ermittelt wurden, ergibt sich als Vergleichsgröße eine Energiedosis von 87,6 mGy/a .

Der Vergleich der möglichen Energiedosen der einzelnen Referenzorganismen mit dem Referenzwert von 87,6 mGy/a erfolgt für Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft in Kapitel 4.1, für Ableitungen radioaktiver Stoffe in Fließgewässern in Kapitel 4.2 und für Ableitungen radioaktiver Stoffe in marine Gewässer in Kapitel 4.3.

4.1 Strahlenexposition von Flora und Fauna bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft

Die vollständigen Ergebnisse der Berechnungen der möglichen Strahlenexposition der Referenzorganismen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft sind in Anhang 2 aufgelistet. Aufgeführt sind die Expositionen über die einzelnen Pfade (siehe Kapitel 2.6) sowie die Summe aller Expositionspfade.

Die Ergebnisse zeigen, dass für alle Radionuklide und alle Referenzorganismen eine Dosisrate von 10 $\mu\text{Gy/h}$ unterschritten wird, wenn der Schutz des Menschen entsprechend den Anforderungen der Strahlenschutzverordnung in Verbindung mit der AVV zu § 47 StrlSchV gewährleistet ist. Die höchste Exposition ergibt sich für das Entenei (12,3 mGy/a für I-128), wobei hier konservativ von einer einjährigen Exposition des Eis ausgegangen wurde.

4.2 Strahlenexposition von Flora und Fauna bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in Fließgewässern

Die vollständigen Ergebnisse der Berechnungen der möglichen Strahlenexposition der Referenzorganismen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in ein Fließgewässer sind in Anhang 3 aufgelistet.

Bei der Berechnung der Dosisraten wurde für Vogel, Bisamratte und Amphibie konservativ davon ausgegangen, dass diese sich ganzjährig im Wasser aufhalten (siehe Kapitel 2.1). Für verschiedene Spezies ist dies eine realistische Annahme. Bei Annahme des Aufenthalts außerhalb des Wasser über eine bestimmte Zeit würden sich stets geringere Dosen ergeben, da die Dosiskonversionskoeffizienten für die

unter terrestrischen Organismen geführten Vögel, Säugetiere und Amphibien stets geringer sind.

Die in Kapitel 3.2.3 abgeleiteten maximalen Konzentrationen führen bei einigen Radionukliden zu Überschreitungen der Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Referenzorganismen, im Maximum bis zu 227 Gy/a. Diese Dosisraten sind in Anhang 3 im Blatt „ohne Einschränkung“ rot hervorgehoben. Von Überschreitungen der Referenzdosisrate betroffen sind alle Referenzorganismen mit Ausnahme des Phytoplanktons.

In Tabelle 4-1 sind diejenigen Radionuklide einschließlich ihrer Halbwertszeiten zusammengestellt, für die Überschreitungen der Referenzdosisrate ermittelt wurden.

Tabelle 4-1: Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen im Süßwasser bei im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal möglicher Kontamination des Wassers

Nuklid	Halbwertszeit	Nuklid	Halbwertszeit	Nuklid	Halbwertszeit
Mn-51	46,2 min	Ag-106	23,96 min	Pb-209	3,253 h
Mn-52	5,6 d	Ag-112	3,12 h	Pb-211	36,1 min
Mn-52m	21,1 min	Ag-115	20 min	Pb-212	10,64 h
Mn-53	3,7E+06 a	Cd-104	57,7 min	Pb-214	26,8 min
Mn-54	312 d	Cd-107	6,49 h	Po-203	36,7 min
Mn-56	2,5785 h	Cd-117	2,49 h	Po-205	1,8 h
Co-55	17,54 h	Cd-117m	3,36 h	Po-207	5,83 h
Co-58m	9,15 h	Sb-115	31,8 min	Ra-227	42,2 min
Co-60m	10,47 min	Sb-116	15,8 min	Th-226	30,9 min
Co-61	1,65 h	Sb-116m	1,005 h	Th-227	18,718 d
Co-62m	13,91 min	Sb-117	2,8 h	U-230	20,8 d
Ni-56	6,1 d	Sb-118m	5 h	U-231	4,2 d
Ni-65	2,52 h	Sb-124m	20,2 min	U-237	6,75 d
Se-70	41 min	Sb-126m	19 min	U-239	23,54 min
Se-73	7,15 h	Sb-129	4,32 h	U-240	14,1 h
Se-73m	39 min	Sb-130	40 min	Np-232	14,7 min
Se-81	18,5 min	Sb-131	23 min	Np-233	36,2 min
Se-81m	57,25 min	Te-116	2,49 h	Np-234	4,4 d
Se-83	22,5 min	Te-127	9,35 h	Np-235	1,085 a
Sr-80	1,667 h	Te-129	1,16 h	Np-238	2,117 d
Sr-81	25,5 min	Te-131	25 min	Np-239	2,355 d
Sr-85m	1,16 h	Te-133	12,45 min	Np-240	1,083 h
Sr-87m	2,805 h	Te-133m	55,4 min	Pu-234	8,8 h
Sr-92	2,71 h	Te-134	41,8 min	Pu-235	25,3 min
Zr-86	16,5 h	I-128	24,99 min	Pu-243	4,956 h
Zr-95	64,0 d	Cs-125	45 min	Pu-245	10,5 h
Zr-97	16,9 h	Cs-127	6,25 h	Am-237	1,22 h
Nb-88	14,3 min	Cs-129	32,06 h	Am-238	1,63 h
Nb-97	1,202 h	Cs-130	29,9 min	Am-239	11,9 h
Nb-98	51,5 min	Cs-134m	2,9 h	Am-240	2,12 d
Tc-93m	43,5 min	Cs-135m	53 min	Am-242	16,02 h
Tc-94m	52 min	Cs-138	32,2 min	Am-244	10,1 h
Tc-96m	51,5 min	Ce-137	9 h	Am-244m	26 min
Tc-101	14,2 min	Eu-158	45,9 min	Am-245	2,05 h
Tc-104	18,2 min	Pb-195m	15,8 min	Am-246	39 min
Ru-94	51,8 min	Pb-198	2,4 h	Am-246m	25 min
Ru-97	2,9 d	Pb-199	1,5 h	Cm-238	2,4 h
Ru-105	4,44 h	Pb-200	21,5 h	Cm-240	27 d
Ag-102	12,9 min	Pb-201	9,4 h	Cm-241	32,8 d
Ag-103	1,095 h	Pb-202m	3,62 h	Cm-242	162,8 d
Ag-104	1,153 h	Pb-203	2,17 d	Cm-249	1,069 h
Ag-104m	33,5 min				

Aus der Zusammenstellung der Radionuklide in Tabelle 4-1 geht hervor, dass es sich weitgehend um sehr kurzlebige (Halbwertszeiten im Bereich von Minuten und Stunden) Radionuklide handelt. Außerdem sind sämtliche Radionuklide von keiner praktischen Bedeutung in der Kerntechnik, der Isotopenanwendung und der Forschung. Bei kurzlebigen Radionukliden wäre darüber hinaus nach Stand von Wissenschaft und Technik eine Rückhaltung durch Abklingen statt einer Ableitung in ein Fließgewässer erforderlich.

Die hier abgeleiteten im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal zulässigen Konzentrationen sind nicht aus einem Ableitungsszenario hergeleitet, um von den Eigenschaften des Vorfluters unabhängig zu sein. Diese Vorgehensweise ist möglich, da alle Expositionsszenarien des Menschen auf der Konzentration im Wasser aufbauen. Bei einer auf eine Ableitung bezogenen radioökologischen Betrachtung würde auch der Aufbau von Tochternukliden einzubeziehen sein, was hier nicht erfolgt ist. In einigen Fällen würden sich daraus zusätzliche Beschränkungen der im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal zulässigen Konzentrationen ergeben. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein kurzlebige Radionuklid ein radioaktives Tochternuklid hat, für das eine geringere Konzentration zulässig wäre. Diese Vorgehensweise ist im Sinne der Aufgabenstellung konservativ, da in diesen Fällen die Dosis des Menschen unterschätzt und die der Referenzorganismen überschätzt wird.

Um weiter zu prüfen, welche Schlussfolgerungen sich unter realistischen und praxisnahen Verhältnissen ergeben, werden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Da nicht der Schutz eines Individuums beim Schutz von Flora und Fauna im Vordergrund steht, muss zur möglichen Schädigung ein gewisses Wasservolumen kontaminiert sein. Auf dieser Basis ergibt sich eine Gesamtaktivität, die kontinuierlich in diesem Wasserkörper vorhanden sein muss.
- Im konventionellen Bereich werden bei der Bewertung des Schutzes der Umwelt nicht generell Orte mit maximaler Schadstoffkonzentration betrachtet¹³.
- Um eine gleichbleibende Konzentration eines Radionuklids in einem definierten Wasserkörper eines Fließgewässers zu erreichen, muss der radioaktive Zerfall durch kontinuierliche Ableitungen kompensiert werden. Hieraus lässt sich eine notwendige jährliche Ableitung ermitteln.
- Neben dem radioaktiven Zerfall kommt es auch zu einem Verlust an Radionukliden durch Wasseraustausch im zu betrachtenden räumlichen Abschnitt

¹³ Im Technical Guidance Document on Risk Assessment des European Chemicals Bureau/Institute for Health and Consumer Protection, Part II, EUR 20418 EN/2 (2003), Abschnitt 2.3.8.1, wird empfohlen, bei der Betrachtung der Schadstoffkonzentration in Oberflächenwasser grundsätzlich von einer vollständigen Vermischung der eingeleiteten Schadstoffe im Vorfluter auszugehen.

des Fließgewässers. Auch dieser Verlust muss durch kontinuierliche Ableitungen kompensiert werden.

- Insgesamt ergibt sich eine notwendige jährliche Ableitung in ein Fließgewässer, die auf eine in der Praxis in Deutschland maximal übliche Gesamtaktivität begrenzt werden kann.

Als insgesamt kontaminierter Wasserkörper wird im Folgenden ein Abschnitt eines Fließgewässers betrachtet, der eine Tiefe von 1 m, eine Breite von 10 m und eine Länge von 500 m hat. Dies ergibt ein Wasservolumen von 5.000 m³. Nicht abgedeckt sind mit dieser Betrachtung Populationen von Lebewesen, die nur ein kleineres Wasservolumen besiedeln würden, beispielsweise Schnecken oder Muscheln ohne besonderes Wanderverhalten. Für diese kann eine Schädigung nicht grundsätzlich aufgrund der Anforderungen zum Schutz des Menschen ausgeschlossen werden. Die Frage, ob ein ausreichender Schutz besteht, kann dann nur im Einzelfall bezogen auf einen konkreten Aktivitätseintrag, einen konkreten Vorfluter und eine konkrete Spezies beurteilt werden.

Um eine gleichbleibende Aktivitätskonzentration in diesem Wasservolumen aufrecht zu erhalten, muss jährlich die folgende Aktivität zugeführt werden:

$$A_r = A_{ges,r} \cdot \lambda_r \cdot 3,15E7 \quad (37)$$

Hierin bedeuten:

A_r : jährlich dem betrachteten Wasserkörper zuzuführende Aktivität des Radionuklids r in Bq a⁻¹

$A_{ges,r}$: im Wasserkörper vorhandene Gesamtaktivität des Radionuklids r in Bq

λ_r : Zerfallskonstante des Radionuklids r in s⁻¹

3,15E7: Sekunden eines Jahres

Die Fließgeschwindigkeit eines Fließgewässers kann sehr unterschiedlich sein, bei einem gestauten oder einem mit Buhnen ausgestatteten Fluss auch sehr gering. Große Unterschiede der Fließgeschwindigkeit können auch im Querprofil eines Fließgewässers vorliegen. In /SSK 1988/ werden zu verschiedenen deutschen Gewässer u. a. folgende Angaben gemacht:

- Mittlere Fließgeschwindigkeit der Donau zwischen Dillingen und Hofkirchen (Fluss-km 2538,30 bis 2256,90)
 - bei mittlerem Niedrigwasserabfluss: 0,5 m s⁻¹ bis 1,0 m s⁻¹,
 - bei mittlerem Abfluss: 0,7 m/s bis 1,6 m s⁻¹,
 - bei mittlerem Hochwasserabfluss: 1,3 m s⁻¹ bis 2,2 m s⁻¹.

- Mittlere Fließgeschwindigkeit des Rheins zwischen Maxau und Wesel (Fluss-km 362,33 bis 814,00)
 - bei mittlerem Niedrigwasserabfluss: $0,6 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,2 \text{ m s}^{-1}$,
 - bei mittlerem Abfluss: $0,8 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,5 \text{ m s}^{-1}$,
 - bei mittlerem Hochwasserabfluss: $1,2 \text{ m s}^{-1}$ bis $2,0 \text{ m s}^{-1}$.

Im Folgenden wird hier als Randbedingung ein Abfluss von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ als Randbedingung zugrunde gelegt. Pro s muss dann die Aktivität eines Wasservolumens von $1 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} = 1 \text{ m}^3$ durch weitere Ableitungen ersetzt werden.

Nach /BMU 2009/ wurden – hier aufgerundet auf Größenordnungen – im Jahr 2008 aus deutschen Kernkraftwerken maximal 10^{+14} Bq H-3, maximal 10^{+9} Bq betastrahlende Spalt- und Aktivierungsprodukte (ohne H-3) und maximal 10^{+6} Bq Alpha-Strahler mit dem Abwasser abgeleitet. Bei den deutschen Forschungszentren waren die Ableitungen demgegenüber geringer.

In Tabelle 4-2 sind die Radionuklide zusammengestellt, bei denen es zu Überschreitungen der Referenzdosisrate von $87,6 \text{ mGy/a}$ (bzw. $10 \text{ } \mu\text{Gy/h}$) bei Referenzorganismen kommt, wenn bestimmte maximale jährliche Emissionen angenommen werden.

Die vollständigen Ergebnisse sind in Anhang 3 in den Blättern „ $1\text{E}11 \text{ Bq}$ “, „ $1\text{E}10 \text{ Bq}$ “ und „ $1\text{E}9 \text{ Bq}$ “ dokumentiert. Überschreitungen der Referenzdosisrate von $87,6 \text{ mGy/a}$ sind jeweils rot hervorgehoben. Bei einzelnen Radionukliden und Referenzorganismen ist die Dosis unabhängig von der Einschränkung der maximalen Einleitung. Dies ist dann der Fall, wenn die zulässige Aktivitätskonzentration zur Einhaltung der Dosisgrenzwerte des Menschen sehr niedrig ist und das Radionuklid eine so große Halbwertszeit aufweist, dass auch unter Berücksichtigung einer andauernden Zuführung des Radionuklids zur Kompensation des Zerfalls im betrachteten Wasservolumen die Begrenzung der jährlichen Einleitung zu keiner zusätzlichen Einschränkung der Aktivitätskonzentration im Wasser führt.

Tabelle 4-2: Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen im Süßwasser unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen

Gesamteinleitung				
1E+11 Bq/a				1E+10 Bq/a
Mn-51	Ag-112	Pb-209	Th-227	Pb-211
Mn-52	Ag-115	Pb-211	U-230	Pb-212
Mn-52m	Cd-117	Pb-212	Am-242	Pb-214
Mn-56	Pb-195m	Pb-214	Am-244	Th-227
Zr-97	Pb-198	Po-203	Cm-238	U-230
Ag-103	Pb-200	Po-205	Cm-240	Am-242
Ag-104m	Pb-201	Th-226	Cm-242	Cm-240
				Cm-242

Wie aus Tabelle 4-2 ersichtlich, kommt es bei einer Begrenzung der jährlichen Ableitung in das Fließgewässer für jedes einzelne Radionuklid auf 10^{+11} Bq/a bei 28 Radionukliden zu einer Überschreitung der Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Referenzorganismen. Betroffen von diesen Überschreitungen sind die Referenzorganismen Gefäßpflanze, Zooplankton, Libellenlarve, Schnecke, Muschel und Krebs. Die maximale Dosisrate beträgt 2,3 Gy/a für die Muschel.

Bei Begrenzung auf 10^{+10} Bq/a verbleiben noch acht Radionuklide mit einer Überschreitung der Referenzdosisrate. Betroffen von diesen Überschreitungen sind die Referenzorganismen Gefäßpflanze, Zooplankton, Libellenlarve, Muschel und Krebs. Die maximale Dosisrate beträgt 630 mGy/a für die Muschel.

Bei Begrenzung auf 10^{+9} Bq/a kommt es bei keinem Radionuklid mehr zu einer Überschreitung der Referenzdosisrate. Die maximale Dosisrate beträgt 63 mGy/a für die Muschel.

Zum besseren Verständnis, wie diese Ergebnisse zustande kommen, sind in Tabelle 4-3 für die einzelnen Szenarien der Begrenzung der jährlichen Aktivitätseinleitung die maximalen Expositionen eines Referenzorganismus, das verursachende Nuklid und die bei diesem Nuklid zum Ausgleich von Zerfall und Transport aus dem betrachteten Wasserkörper jährlich nachzuspeisende Aktivität zusammengestellt. Ohne Begrenzung der Aktivitätseinleitung ergibt sich die maximale Dosis bei Pb-214. Wird die Aktivitätseinleitung auf $1E+11$ Bq/a begrenzt, so führt Pb-211 zur höchsten Dosis, da $1,03E+13$ Bq/a Pb-214 eingeleitet werden müssten, um die maximal zum Schutz des Menschen noch zulässige Aktivitätskonzentration im Wasserkörper aufrecht zu erhalten. Die ohne Einschränkung der Aktivitätseinleitung maximal zulässige Aktivitätskonzentration an Pb-211 würde für die Muschel zu einer Strahlenexposition von 143 Gy/a führen. Um diese Strahlenexposition zu erreichen, müssten $6,25E+12$ Bq/a zur Aufrechterhaltung der maximal zulässigen Konzentration eingeleitet werden. Diese Einleitung ist aber auf $1E+11$ Bq/a begrenzt, so dass sich die maximale Strahlenexposition zu

$$(143 \text{ Gy/a}) \cdot (1\text{E}+11 \text{ Bq/a}) / (6,25\text{E}+12 \text{ Bq/a}) = 2,3 \text{ Gy/a}$$

ergibt. Beim Übergang der Begrenzung der Einleitung von $1\text{E}+10 \text{ Bq/a}$ auf $1\text{E}+09 \text{ Bq/a}$, also einer Reduktion der eingeleiteten Menge um einen Faktor 10, ergibt sich ebenfalls bei der Strahlenexposition eine Reduktion um den Faktor 10, da in beiden Einleitungsszenarien das Nuklid Pb-212 maßgeblich ist und der Wert der zum Erreichen der maximalen Strahlenexposition jährlich nachzuspeisenden Aktivität in beiden Fällen nicht erreicht werden kann.

Tabelle 4-3: Ungünstigste Nuklide und Referenzorganismen in den einzelnen Einleitungsszenarien in ein Fließgewässer

Szenario der Aktivitätseinleitung	maximale Exposition eines Organismus (in mGy/a)	Nuklid	Organismus	nachzuspeisende Aktivität (in Bq/a)	Exposition ohne Einschränkung (in mGy/a)
unbegrenzt	227.000	Pb-214	Muschel	$1,03\text{E}+13$	227.000
$\leq 1\text{E}+11 \text{ Bq/a}$	2.300	Pb-211	Muschel	$6,25\text{E}+12$	143.000
$\leq 1\text{E}+10 \text{ Bq/a}$	630	Pb-212	Muschel	$2,80\text{E}+10$	1.760
$\leq 1\text{E}+09 \text{ Bq/a}$	63	Pb-212	Muschel	$2,80\text{E}+10$	1.760

4.3 Strahlenexposition von Flora und Fauna bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in marine Gewässer

Die vollständigen Ergebnisse der Berechnungen der möglichen Strahlenexposition der Referenzorganismen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe in ein marines Gewässer sind in Anhang 4 aufgelistet.

Die in Kapitel 3.2.3 abgeleiteten maximalen Konzentrationen führen bei einigen Radionukliden zu Überschreitungen der Referenzdosisrate von $87,6 \text{ mGy/a}$ (bzw. $10 \mu\text{Gy/h}$) bei Referenzorganismen, im Maximum bis zu $9,85 \text{ Gy/a}$ bei der Seeanemone. Diese Dosisraten sind in Anhang 4 im Blatt „ohne Einschränkung“ rot hervorgehoben. Von Überschreitungen der Referenzdosisrate betroffen sind sämtliche Referenzorganismen.

In Tabelle 4-4 sind diejenigen Radionuklide zusammengestellt, für die es zu Überschreitungen der Referenzdosisrate von $87,6 \text{ mGy/a}$ kommt.

Tabelle 4-4: Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen in marinen Gewässern bei im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal möglicher Kontamination des Wassers

Nuklid	Halbwertszeit	Nuklid	Halbwertszeit	Nuklid	Halbwertszeit
Na-24	15 h	Tc-104	18,2 min	Po-203	36,7 min
Si-31	2,622 h	Ru-94	51,8 min	Po-205	1,8 h
Cl-38	37,21 min	Ru-105	4,44 h	Ra-227	42,2 min
Cl-39	55,6 min	Cd-104	57,7 min	Th-226	30,9 min
K-45	20 min	Sb-115	31,8 min	U-230	20,8 d
Mn-51	46,2 min	Sb-116	15,8 min	U-239	23,54 min
Mn-52m	21,1 min	Sb-116m	1,005 h	Np-232	14,7 min
Co-60m	10,47 min	Sb-124m	20,2 min	Np-233	36,2 min
Co-62m	13,91 min	Sb-126m	19 min	Np-240	1,083 h
Sr-80	1,667 h	Sb-130	40 min	Pu-234	8,8 h
Sr-81	25,5 min	Sb-131	23 min	Pu-235	25,3 min
Sr-85m	1,16 h	Cs-125	45 min	Am-237	1,22 h
Sr-87m	2,805 h	Cs-127	6,25 h	Am-238	1,63 h
Sr-91	9,5 h	Cs-130	29,9 min	Am-242	16,02 h
Sr-92	2,71 h	Cs-134m	2,9 h	Am-244m	26 min
Nb-88	14,3 min	Cs-135m	53 min	Am-245	2,05 h
Nb-89	2,03 h	Cs-138	32,2 min	Am-246	39 min
Nb-97	1,202 h	Eu-158	45,9 min	Am-246m	25 min
Nb-98	51,5 min	Pb-195m	15,8 min	Cm-238	2,4 h
Tc-93m	43,5 min	Pb-199	1,5 h	Cm-249	1,069 h
Tc-96m	51,5 min	Pb-211	36,1 min		
Tc-101	14,2 min	Pb-214	26,8 min		

Aus der Zusammenstellung der Radionuklide in Tabelle 4-4 geht hervor, dass es sich – wie schon bei den entsprechenden Radionukliden in Fließgewässern - weitgehend um sehr kurzlebige (Halbwertszeiten im Bereich von Minuten und Stunden) Radionuklide handelt. Außerdem sind sämtliche Radionuklide von keiner praktischen Bedeutung in der Kerntechnik, der Isotopenanwendung und der Forschung. Bei kurzlebigen Radionukliden wäre auch hier nach Stand von Wissenschaft und Technik eine Rückhaltung durch Abklingen statt einer Ableitung in ein marines Gewässer erforderlich.

Wie schon bei den Untersuchungen für Fließgewässer liegt auch den hier abgeleiteten im Hinblick auf den Schutz des Menschen maximal zulässigen Konzentrationen in marinen Gewässern kein Ableitungsszenario zugrunde. Zur weiteren Prüfung, welche Schlussfolgerungen sich unter realistischen und praxisnahen Verhältnissen ergeben, werden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Da nicht der Schutz eines Individuums beim Schutz von Flora und Fauna im Vordergrund steht, muss zur möglichen Schädigung ein gewisses Wasservolumen kontaminiert sein. Auf dieser Basis ergibt sich eine Gesamtaktivität, die kontinuierlich in diesem Wasserkörper vorhanden sein muss.
- Im konventionellen Bereich werden bei der Bewertung des Schutzes der Umwelt nicht generell Orte mit maximaler Schadstoffkonzentration betrachtet¹⁴.
- Um eine gleichbleibende Konzentration eines Radionuklids in einem definierten marinen Wasserkörper zu erreichen, muss der radioaktive Zerfall durch kontinuierliche Ableitungen kompensiert werden. Hieraus lässt sich eine notwendige jährliche Ableitung ermitteln.
- Neben dem radioaktiven Zerfall kommt es auch zu einem Verlust an Radionukliden durch Wasseraustausch im zu betrachtenden marinen Wasserkörper. Auch dieser Verlust muss durch kontinuierliche Ableitungen kompensiert werden.
- Insgesamt ergibt sich eine notwendige jährliche Ableitung in ein marines Gewässer, die auf eine in der Praxis maximal übliche Gesamtaktivität begrenzt werden kann.

Als insgesamt kontaminierter Wasserkörper wird im Folgenden ein mariner Wasserkörper betrachtet, der eine Tiefe von 10 m, eine Fläche von 1 Mio. m² hat. Dies ergibt ein Wasservolumen von 10⁷ m³. Nicht abgedeckt sind mit dieser Betrachtung Populationen von Lebewesen, die nur ein kleineres Wasservolumen besiedeln würden, beispielsweise Schnecken oder Muscheln ohne besonderes Wanderverhalten. Für diese kann eine Schädigung nicht grundsätzlich aufgrund der Anforderungen zum Schutz des Menschen ausgeschlossen werden. Die Frage, ob ein ausreichender Schutz besteht, kann dann nur im Einzelfall bezogen auf einen konkreten Aktivitätseintrag, einen konkreten Ausbreitungssituation und eine konkrete Spezies beurteilt werden.

Die jährlich dem betrachteten Wasserkörper zugeführte Aktivität wird entsprechend der weiter oben in Kapitel 4.2 angegebenen Gleichung (37) ermittelt. Als Was-

¹⁴ Im Technical Guidance Document on Risk Assessment des European Chemicals Bureau/Institute for Health and Consumer Protection, Part II, EUR 20418 EN/2 (2003), Abschnitt 4.2.4.1, wird empfohlen, bei der Betrachtung der küstennahen Schadstoffkonzentration in einem marinen Gewässer von einer Verdünnung der eingeleiteten Schadstoffe um den Faktor 100 auszugehen.

seraustauschrate wird 1% pro Tag angesetzt. Pro Tag muss dann die Aktivität eines Wasservolumens von 10^{+5} m³ durch weitere Ableitungen ersetzt werden.

Die größten Einleitungen radioaktiver Stoffe in die Nordsee erfolgen durch die Wiederaufarbeitungsanlagen für abgebrannte Brennelemente in La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien). Deren Ableitungen sind in der Vergangenheit gegenüber früheren Zeiträumen, insbesondere den 1960er und 1970er Jahren, reduziert worden. Ende der 1990er Jahre wurden noch – hier aufgerundet auf Größenordnungen – bis zu 10^{+16} Bq H-3, bis zu 10^{+14} Bq Beta-Strahler (ohne H-3) und bis zu 10^{+12} Bq Alpha-Strahler mit dem Abwasser über Pipelines ins Meer abgegeben.

In Tabelle 4-5 sind die Radionuklide zusammengestellt, bei denen es zu Überschreitungen der Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Referenzorganismen kommt, wenn bestimmte maximale jährliche Emissionen angenommen werden.

Die vollständigen Ergebnisse sind in Anhang 4 in den Blättern „1E16 Bq“, „1E15 Bq“, „1E14 Bq“, „1E13 Bq“, „1E12 Bq“, „1E11 Bq“ und „1E10 Bq“ dokumentiert. Überschreitungen der Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a sind jeweils rot hervorgehoben. Bei einzelnen Radionukliden und Referenzorganismen ist die Dosis unabhängig von der Einschränkung der maximalen Einleitung. Dies ist dann der Fall, wenn die zulässige Aktivitätskonzentration zur Einhaltung der Dosisgrenzwerte des Menschen sehr niedrig ist und das Radionuklid eine so große Halbwertszeit aufweist, dass auch unter Berücksichtigung einer andauernden Zuführung des Radionuklids zur Kompensation des Zerfalls im betrachteten Wasservolumen die Begrenzung der jährlichen Einleitung zu keiner zusätzlichen Einschränkung der Aktivitätskonzentration im Wasser führt.

Tabelle 4-5: Radionuklide mit Überschreitung einer Referenzdosisrate von 87,6 mGy/a (bzw. 10 µGy/h) bei Organismen in marinen Gewässern unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen und bestimmten maximalen Ableitungen radioaktiver Stoffe im Jahr

Nuklid	Überschreitung von 87,6 mGy/a bei						Nuklid	Überschreitung von 87,6 mGy/a bei					
	1E16 Bq/a	1E15 Bq/a	1E14 Bq/a	1E13 Bq/a	1E12 Bq/a	1E11 Bq/a		1E16 Bq/a	1E15 Bq/a	1E14 Bq/a	1E13 Bq/a	1E12 Bq/a	1E11 Bq/a
Mn-51	X	X	X				Cs-127	X	X				
Mn-52m	X	X	X				Cs-130	X					
Co-60m	X						Cs-134m	X					
Co-62m	X	X					Cs-135m	X					
Sr-80	X						Cs-138	X					
Sr-83	X						Eu-158	X	X				
Sr-87m	X						Pb-195m	X	X	X			
Sr-91	X	X					Pb-199	X	X	X			
Sr-92	X						Pb-211	X	X	X	X		
Nb-88	X	X					Pb-214	X	X	X			
Nb-89	X	X	X				Po-203	X	X	X			
Nb-97	X	X					Po-205	X	X	X			
Nb-98	X	X					Th-226	X	X	X	X		
Tc-93m	X	X					U-230	X	X	X	X	X	X
Tc-96m	X	X					U-239	X					
Tc-101	X	X					U-240	X	X				
Tc-104	X	X	X				Np-240	X					
Ru-94	X	X					Pu-234	X	X	X			
Ru-105	X	X	X				Am-237	X	X				
Cd-104	X	X	X				Am-238	X	X				
Sb-115	X						Am-242	X	X	X	X		
Sb-116	X						Am-244m	X	X				
Sb-116m	X						Am-245	X	X				
Sb-124	X						Am-246	X	X				
Sb-126m	X						Am-246m	X	X				
Sb-130	X						Cm-238	X	X	X			
Sb-131	X						Cm-249	X	X				
Cs-125	X												

Die noch maximal möglichen Dosisraten betragen

- 2.710 mGy/a für Zooplankton bei Ableitungen bis 10^{+16} Bq/a,
- ebenfalls 2.710 mGy/a für Zooplankton bei Ableitungen bis 10^{+15} Bq/a,
- 894 mGy/a für Zooplankton bei Ableitungen bis 10^{+14} Bq/a,
- 376 mGy/a für Wattwurm und Schnecke bei Ableitungen bis 10^{+13} Bq/a (von Überschreitungen der Referenzdosisrate sind bei diesen maximalen Ableitungen noch Zooplankton, Wattwurm, Schnecke und Seeanemone betroffen),

- 125 mGy/a für die Seeanemone als einzigem Referenzorganismus mit einer Überschreitung der Referenzdosisrate bei Ableitungen bis 10^{+12} Bq/a,
- 108 mGy/a für die Seeanemone als einzigem Referenzorganismus mit einer Überschreitung der Referenzdosisrate bei Ableitungen bis 10^{+11} Bq/a und
- 73,5 mGy/a (Wert unterhalb der hier angesetzten Referenzdosisrate) für die Schnecke bei Ableitungen bis 10^{+10} Bq/a.

Zum besseren Verständnis, wie diese Ergebnisse zustande kommen, sind in Tabelle 4-6, analog wie bei den Einleitungen in ein Fließgewässer weiter oben, für die einzelnen Szenarien der Begrenzung der jährlichen Aktivitätseinleitung die maximalen Expositionen eines Referenzorganismus, das verursachende Nuklid und die bei diesem Nuklid zum Ausgleich von Zerfall und Transport aus dem betrachteten Wasserkörper jährlich nachzuspeisende Aktivität zusammengestellt. Wie schon in Kapitel 4.2 für die Einleitungen in ein Fließgewässer lassen sich die Ergebnisse aus dem Zusammenwirken von Einleitungsbegrenzung und zum Erreichen der maximalen Strahlenexposition notwendigen jährlichen Nachspeisung von Aktivität sowie durch den Wechsel der jeweils zur höchsten Exposition führenden Radionuklide nachvollziehen

Tabelle 4-6: Ungünstigste Nuklide und Referenzorganismen in den einzelnen Einleitungsszenarien in ein marines Gewässer

Szenario der Aktivitätseinleitung	maximale Exposition eines Organismus (in mGy/a)	Nuklid	Organismus	nachzuspeisende Aktivität (in Bq/a)	Exposition ohne Einschränkung (in mGy/a)
unbegrenzt	9.850	Sr-85m	Seeanemone	2,88E+18	9.850
$\leq 1E+16$ Bq/a	2.710	Th-226	Zooplankton	3,04E+14	2.710
$\leq 1E+15$ Bq/a	2.710	Th-226	Zooplankton	3,04E+14	2.710
$\leq 1E+14$ Bq/a	894	Th-226	Zooplankton	3,04E+14	2.710
$\leq 1E+13$ Bq/a	376	Am-242	Wattwurm/Schnecke	8,42E+12	376
$\leq 1E+12$ Bq/a	125	U-230	Seeanemone	1,17E+11	125
$\leq 1E+11$ Bq/a	108	U-230	Seeanemone	1,17E+11	125
$\leq 1E+10$ Bq/a	73,5	Cm-240	Schnecke	8,00E+09	73,5

Literaturverzeichnis

- AVV 2005 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV, Stand 13.05.2005
- Beresford 2008 Beresford NA, Barnett CL, Howard BJ, Scott WA, Brown JE, Copplestone D (2008): Derivation of transfer parameters for use within the ERICA Tool and the default concentration ratios for terrestrial biota. *Journal of Environmental Radioactivity* 99: 1393–1407.
- Berger 1999 Berger MJ (1999) ESTAR, PSTAR, and ASTAR: computer programs for calculating stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. National Institute of Standards and Technology Report NISTIR 4999. NIST, Gaithersburg, MD. Available on-line: <http://physics.nist.gov/Star>
- BMU 2009 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Bonn, Dezember 2009
- Brown 2008 Brown J, Alfonso B, Avila R, Beresford N, Copplestone D, Pröhl G, Ulanovsky A (2008): The ERICA Tool. *Journal of Environmental Radioactivity* 99:1371–1383.
- Bride 2000 Bride RW, Armour SJ, Yee E (2000): Allometric respiration/body mass data for animals to be used for estimates of inhalation toxicity to young adult humans. *Journal of Applied Toxicology* 20:273–290.
- Clarke 2010 Clarke A, Rothery P, Isaac NJB (2010): Scaling of basal metabolic rate with body mass and temperature in mammals. *Journal of Animal Ecology* 79:610–619.
- Eckerman 1993 Eckerman KF, Ryman JC (1993): External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Federal Guidance Report No. 12. United States Environmental Protection Agency, EPA 402-R-93-081. Washington, DC.
- Eckerman 1994 Eckerman KF, Westfal RJ, Ryman JC, Cristy M (1994): Availability of nuclear decay data in electronic form, including beta spectra not previously published. *Health Physics* 67:338–345.
- Gómez-Ros 2008 Gómez-Ros JM, Pröhl G, Ulanovsky A, Lis M (2008) Uncertainties of internal exposure of animals and plants due to non-homogeneously distributed radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity* 99:1449–1455.
- GRNC 1999 Groupe Radioécologie Nord Cotentin: Modèles de transfert des radionucléides dans l'environnement, Sous-groupe n° 3, Rapport final détaillé Volume 3, Juli 1999
- Higley 2003a Higley KA, Domotor SL, Antonio EJ, Kocher DC (2003): Derivation of a screening methodology for evaluating radiation dose to aquatic and terrestrial biota. *Journal of Environmental Radioactivity* 66:41–59.
- Higley 2003b Higley KA, Domotor SL, Antonio EJ (2003b) A kinetic-allometric approach to predicting tissue radionuclide concentrations for biota. *Journal of Environmental Radioactivity* 66:61–74.
- Higley 2007 Higley KA, Bytwerk DP (2007): Generic approaches to transfer. *Journal of Environmental Radioactivity* 98:4–23.

-
- HMWT 1980 Der Hessische Minister für Wirtschaft und Technik (HMWT): Modellstudie Radioökologie Biblis, Materialienband Luftpfad - Teilstudie 14 – Meteorologische Daten zu Ausbreitungsrechnungen für den Standort des Kernkraftwerkes Biblis A, B, C, Wiesbaden 1980
- Hubbel 1995 Hubbel JH, Seltzer SM (1995) Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. National Institute of Standards and Technology Report NISTIR 5632. NIST, Gaithersburg, MD. On-line: <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>
- IAEA 2001 International Atomic Energy Agency: Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Report Series No. 19, Wien, 2001
- IAEA 2004 International Atomic Energy Agency: Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment, Technical Report Series No. 422, Wien, 2004
- IAEA 2010 International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Report Series No. 472, Wien, 2010
- ICRP 1960 International Commission on Radiological Protection (1960): Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation. ICRP Publication 2.
- ICRP 1979 International Commission on Radiological Protection (1979): Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Annals of the ICRP 2(3–4).
- ICRP 1980 International Commission on Radiological Protection (1980): Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 2. Annals of the ICRP 4(3–4).
- ICRP 1981 International Commission on Radiological Protection (1981): Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 3. Annals of the ICRP 6(2–3).
- ICRP 1983 International Commission on Radiological Protection (1983): Radionuclide transformations: energy and intensity of emissions. ICRP Publication 38. Annals of the ICRP 11–13.
- ICRP 1988 International Commission on Radiological Protection (1988): Limits for intakes of radionuclides by workers: An Addendum. ICRP Publication 30, Part 4. Annals of the ICRP 19(4).
- ICRP 1989 International Commission on Radiological Protection (1989): Age-dependent doses to members of the public from intake of the radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Annals of the ICRP 20(2).
- ICRP 1993 International Commission on Radiological Protection (1993): Age-dependent doses to members of the public from intake of the radionuclides: Part 2, Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Annals of the ICRP 23(3–4).
- ICRP 1994a International Commission on Radiological Protection (1994): Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Annals of the ICRP 24(1–3).

- ICRP 1994b International Commission on Radiological Protection (1994): Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Annals of the ICRP 24(2).
- ICRP 1995a International Commission on Radiological Protection (1995): Age-dependent doses to members of the public from intake of the radionuclides: Part 3, Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Annals of the ICRP 25(1).
- ICRP 1995b International Commission on Radiological Protection (1995): Age-dependent doses to members of the public from intake of the radionuclides: Part 4, Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Annals of the ICRP 25(3–4).
- ICRP 1996 International Commission on Radiological Protection (1996): Age-dependent doses to members of the public from intake of the radionuclides: Part 5, Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Annals of the ICRP 26(1).
- ICRP 2002 International Commission on Radiological Protection (2002): Guide for the practical application of the ICRP human respiratory tract model. ICRP Supporting Guidance 3. Annals of the ICRP 32(1–2).
- ICRP 2003 International Commission on Radiological Protection (2003): A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91. Annals of the ICRP 33(3):201–270.
- ICRP 2008a International Commission on Radiological Protection (2008): Nuclear decay data for dosimetric calculations. ICRP Publication 107. Annals of the ICRP 38(3): e1–e26, 1–96.
- ICRP 2008b International Commission on Radiological Protection (2008): Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. Annals of the ICRP 38(4–6).
- Jones 2009 Jones KE, Bielby J, Cardillo M, Fritz SA, O'Dell J, Orme CDL, Safi K, Sechrest W, Boakes EH, Carbone C, Connolly C, Cutts MJ, Foster JK, Grenyer R, Habib M, Plaster CA, Price SA, Rigby EA, Rist J, Teacher A, Bininda-Emonds ORP, Gittleman JL, Mace GM, Purvis A (2009): PanTHERIA: a species-level database of life-history, ecology, and geography of extant and recently extinct mammals. *Ecology*, 90, 2648.
- Kitchings 1976 Kitchings T, DiGregorio D, Van Voris P (1976): A review of the ecological parameters of radionuclide turnover in vertebrate food chains. In: *Radioecology and Energy Resources*, C.E. Cushing et al., Eds. Downloaded from www.osti.gov/bridge (OSTI ID: 4227482) 15.12.2010
- Kleiber 1947 Kleiber M (1947): Body size and metabolic rate. *Physiological Reviews* 27:511–541.
- Larsson 2004 Larsson CM (2004): The FASSET framework for assessment of environmental impact of ionizing radiation in European ecosystems – an overview. *Journal of Radiological Protection* 24:A1–A12.
- Larsson 2008 Larsson CM (2008): An overview of the ERICA integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing contaminants. *Journal of Environmental Radioactivity* 99:1364–1370.
- Loevinger 1976 Loevinger R, Berman M (1976) A revised schema for calculating the absorbed dose from biologically distributed radionuclides NM/MIRD Pamphlet No. 1, Rev., March 1976, Society of Nuclear Medicine, NY.

- Marquet 2005 Marquet PA, Quiñones RA, Abades S, Labra F, Tognelli M, Arim M, Rivadeneira M (2005): Scaling and power-laws in ecological systems. *Journal of Experimental Biology* 208: 1749–1769.
- Melintescu 2010 Melintescu A, Galeriu D (2010) Energy metabolism used as a tool to model the transfer of ¹⁴C and ³H in animals. *Radiat Environ Biophys* 49:657–672.
- Nagy 2005 Nagy KA (2005): Field metabolic rate and body size. *Journal of Experimental Biology* 208:1621–1625.
- NCRP 1991 NCRP (1991) Effects of ionizing radiation on aquatic organisms. NCRP Report No. 109. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NRPB 1995 National Radiological Protection Board: Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment, Report EUR 15760, Radiation Protection 72, Luxembourg 1995
- Richmont 1962 Richmond CR, Langham WH, Trujillo TT (1962) Comparative metabolism of tritiated water by mammals. *J. of Cellular Physiology* 56:45–53.
- Rubner 1883 Rubner M (1883): Über den Einfluss der Körpergröße auf Stoff- und Kraftwechsel. *Zeitschrift für Biologie* 19:535–562.
- Shultis 1996 Shultis JK, Faw RE (1996) Radiation shielding. Prentice Hall PTR, NJ
- Silk 1997 Silk TJ, Phipps AW, Bailey (1997): Effects on dose coefficients for workers of recent changes in internal dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry* 71(1):7–21.
- Stara 1971 Stara JF, Nelson NS, Della Rosa RJ, Bustad LK (1971) Comparative metabolism of radionuclides in mammals: a review. *Health Physics* 20:113–137.
- StrlSchV 2001 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001, Nr. 38), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I 2008, S. 1793)
- SSK 1988 Strahlenschutzkommission (SSK): Radionuklide in Wasser-Schwebstoff-Sediment-Systemen und Abschätzung der Strahlenexposition, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission – Band 9, 1988
- Taranenko 2004 Taranenko V, Pröhl G, Gómez-Ros JM (2004): Absorbed dose rate conversion coefficients for reference biota for external photon and internal exposures. *J. Radiol. Prot.* 24:A35–A62.
- Ulanovsky 2006 Ulanovsky A, Pröhl G (2006): A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. *J. Environ. Biophys.* 45, 203–214.
- Ulanovsky 2008a Ulanovsky A, Pröhl G, Gómez-Ros JM (2008): Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota. *Journal of Environmental Radioactivity* 99(9):1440–1448.
- Ulanovsky 2008b Ulanovsky A, Pröhl G (2008): Tables of dose conversion coefficients for estimating internal and external radiation exposures to terrestrial and aquatic biota. *Radiation and Environmental Biophysics* 47:195–203.

-
- USDOE 2002 USDOE (2002) A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Technical standard DOE-STD-1153-2002. U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- Vives 2007 Vives i Battle J, Balonov M, Beaugelin-Seiller K, Beresford N, Brown N, Cheng JJ, Copplestone D, Doi M, Filistovic V, Golikov V, Horyna J, Hosseini A, Howard B, Jones SR, Kamboj S, Kryshev A, Nedveckaite T, Olyslaegers G, Pröhl G, Sazykina T, Ulanovsky A, Vives Lynch S, Yankovich T, Yu C (2007): Intercomparison of absorbed dose rates for non-human biota. *Radiation and Environmental Biophysics* 46:349–373.
- Vives 2009 Vives i Battle J, Wilson RC, Watts SJ, McDonald P, Craze A (2009) Derivation of allometric relationships for radionuclides in marine phyla. *Radio-protection* 44(5):47–52.
- West 2005 West GB, Brown JH (2005): The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. *Journal of Experimental Biology* 208: 1575-1592.
- Whicker 1982 Whicker FW, Schultz V (1982) *Radioecology: Nuclear Energy and the Environment*. Volume II. CRC Press, Boca Raton, FL.
- White 2005 White CR, Seymour, RS (2005): Allometric scaling of mammalian metabolism. *Journal of Experimental Biology* 208:1611–1619.
- Zach 1985 Zach R (1985): Contribution of inhalation by food animals to man's ingestion dose. *Health Physics* 49(5):737–745.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz