



Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen

Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

Abteilung A – Aufsicht

Wegelystraße 8
10623 Berlin

Telefon: 030 18432 – 0
Internet: www.base.bund.de

Stand: Dezember 2022

Vorwort

Der vorliegende Text der „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ wurde durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) erstellt.

In der Berechnungsgrundlage findet die regulatorische Festlegung von Anforderungen und Vorgehensweisen statt, die der:die Vorhabenträger:in für die Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle bei der Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zugrunde zu legen hat.

Erläuternde Hinweise, Begründungen sowie Hintergrundmaterialien werden separat bereitgestellt, um das Verständnis und die Anwendung dieser Berechnungsgrundlage zu unterstützen. Erläuternde Inhalte und Bezüge zu Quellen wurden in diesem Dokument auf ein für das Verständnis nötiges Minimum beschränkt.

Die Federführung und die Gesamtverantwortung für die Erstellung dieses Dokuments liegen beim BASE.

Das BfS ist inhaltlich verantwortlich für die Biosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung. Dies sind das Kapitel 4, sofern die Biosphärenmodellierung unmittelbar betroffen ist, das Kapitel 8.4, das Kapitel 12 sowie Anhang A2 bis A5.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Anwendungsbereich	7
3	Begriffsbestimmungen	8
4	Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis	10
5	Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung	13
6	Systematik und Typen von Modellen	14
7	Potentielle Entwicklungen des Endlagers	15
8	Umgang mit Ungewissheiten	16
9	Radionuklidinventar und Auswahlprozess	20
10	Geosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung	22
11	Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell	28
12	Biosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung	29
13	Literatur	57
Anhang A1.	Sprachliche Konventionen	58
Anhang A2.	Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten	60
Anhang A3.	Daten zur Berechnung des Radionuklidtransports in der Biosphäre	64
Anhang A4.	Lebensgewohnheiten der repräsentativen Person	73
Anhang A5.	Symbolverzeichnis	75

1 Einleitung

(1) Das Standortauswahlgesetz (StandAG, Deutscher Bundestag 2017) und die *Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* sowie die *Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (BMUV 2020b, 2020c) legen die grundlegenden Randbedingungen für die Abschätzung der zusätzlichen Exposition der Bevölkerung im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren fest. An dieser Stelle wird daher auf den Anspruch in § 1 Absatz 2 StandAG verwiesen, der an das Standortauswahlverfahren und somit auch an die Dosisabschätzung gestellt wird und lautet: „Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet.“ Dieser Anspruch schlägt sich in den nachfolgend formulierten Regelungen nieder und begründet, neben den rein qualitativen Ansprüchen an die durchzuführenden Arbeiten, die umfassenden Anforderungen an die Dokumentation, die Abwägung von Alternativen und die Betrachtung von Ungewissheiten.

(2) Der Ablauf des Standortauswahlverfahrens lässt sich gemäß StandAG in drei aufeinander folgende Phasen gliedern, in denen jeweils vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen sind:

Tabelle 1: Ablauf des Standortauswahlverfahrens

Phase	Wesentliche Elemente im Standortauswahlverfahren	Vorläufige Sicherheitsuntersuchung (vSu)
1	Ermittlung von Teilgebieten und von Standortregionen für übertägige Erkundung	repräsentative vSu
2	Übertägige Erkundung von Standortregionen und Ermittlung von Standorten für untertägige Erkundung	weiterentwickelte vSu
3	Untertägige Erkundung von Standorten und Standortentscheidung durch Bundesgesetz	umfassende vSu

(3) Die §§ 26 und 27 StandAG bilden den Rahmen für die Anforderungen an die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSu). Diese Anforderungen werden in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV, BMUV 2020c) und in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV, BMUV 2020b) festgelegt. In den vSu stellt die Dosisabschätzung eine von mehreren Analysen dar, welche die Langzeitsicherheit eines Endlagers über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren darstellen und prüfen (Abschnitt 2 EndlSiAnfV sowie §§ 7 und 9 EndlSiUntV). In der EndlSiAnfV ist vorgegeben, dass als Indikator für die geringfügigkeit der möglichen zusätzlichen Exposition die zusätzliche mittlere effektive Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung heranzuziehen ist, „die während des Bewertungszeitraums durch Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen auftreten kann“ (§ 7 Absatz 1 EndlSiAnfV). Dieser

Regelung liegt das Verständnis zugrunde, dass die zu berechnende zusätzliche mittlere effektive Jahresdosis aufgrund des Bewertungszeitraums von 1 Million Jahre und der damit verbundenen Ungewissheiten keine prognostizierbare Größe darstellen kann. Daher ist die mögliche zusätzliche mittlere effektive Jahresdosis zwar numerisch zu berechnen, das Ergebnis wird jedoch als Abschätzung bezeichnet. Der § 4 Absatz 4 EndlSiUntV sieht die Anwendung einer einheitlichen Berechnungsgrundlage in den Phasen 2 und 3 des Standortauswahlverfahrens für diese Dosisabschätzung vor.

(4) Die Berechnungsgrundlage ist standortunabhängig konzipiert. Sie enthält keine konkreten unterschiedlichen Vorgaben für die Dosisabschätzung in den weiterentwickelten und umfassenden vSu des Standortauswahlverfahrens. Aus dem unterschiedlichen Informationsstand in den beiden Phasen resultieren jedoch unterschiedliche Erwartungshaltungen an die fachliche Tiefe der Dosisabschätzungen.

(5) Die hier vorliegende Berechnungsgrundlage legt die Anforderungen und Vorgehensweisen fest, die bei der Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Zuge der vSu einzuhalten sind. Es ist zulässig, von den Vorgaben der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung abzuweichen, wenn ein zur Erreichung der formulierten Ziele mindestens gleichwertiger Lösungsansatz verfolgt und die Grundsätze in Kapitel 4 weiterhin eingehalten werden. Ein abweichendes Vorgehen ist unter Darstellung der Vor- und Nachteile gegenüber dem Vorgehen nach den Regelungen der Berechnungsgrundlage zu begründen.

(6) Die abgeschätzte Dosis hat den Charakter eines Indikators, der die jeweilige Radiotoxizität der ausgetragenen Radionuklide und ihr unterschiedliches, dynamisches Verhalten in der Geo- und Biosphäre über den gesamten Bewertungszeitraum widerspiegelt.

(7) Aus Konsistenzgründen sind die Vorgaben zur Biosphärenmodellierung soweit wie möglich an aktuelle Berechnungsvorschriften des Strahlenschutzes angelehnt. Bei der Dosisabschätzung werden keine zusätzlichen jährlichen effektiven Dosen für zukünftig *tatsächlich* lebende Personen berechnet. Die abgeschätzte Dosis wird als ein Indikator für die Sicherheit eines Endlagers verwendet und stellt keine Prognose dar.

(8) Internationale Empfehlungen, wie die der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) und der Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), wurden bei der Erstellung dieser Berechnungsgrundlage berücksichtigt.

(9) Das Regelwerk zur Dosisabschätzung beruht zu wesentlichen Teilen auf Konzepten und fachlichen Hintergründen des Strahlenschutzes (insbesondere Kapitel 12 zur Biosphärenmodellierung). Die dabei verwendeten Begrifflichkeiten sind in ihrer Bedeutung genau festgelegt und erfordern zum Verständnis Kenntnisse der Dosimetrie und Radioökologie. Die für diesen Regelungstext wichtigsten Begriffe wurden in Kapitel 3 „Begriffsbestimmungen“ aufgenommen. Darüber hinaus werden sprachliche Konventionen zu allgemeinen, nicht-fachlichen Begrifflichkeiten verwendet, die in Anhang A1 dargestellt sind.

2 Anwendungsbereich

2.1 Beschreibung des Anwendungsbereichs

- (1) Die vorliegende Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen ist im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Rahmen der weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen anzuwenden (§ 4 Absatz 4 EndlSiUntV).
- (2) Das Ziel der Berechnungsgrundlage ist die Konkretisierung der regulatorischen Anforderungen und die Festlegung der Vorgehensweisen für die Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung, die nach § 9 Absatz 1 Nummer 3 EndlSiUntV als Teil der Langzeitsicherheitsanalyse für jeden Untersuchungsraum durchzuführen ist.
- (3) Die EndlSiUntV erlaubt unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit einer Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen im selben Endlagerbergwerk nach den Vorgaben in § 21 Absatz 3 EndlSiAnfV. In so einem Fall gelten alle Vorgaben dieser Berechnungsgrundlage ebenfalls für das Abfallinventar der vorgesehenen schwach- und mittelradioaktiven Abfälle, obwohl die Berechnungsgrundlage nur die hochradioaktiven Abfälle konkret benennt.

2.2 Abgrenzung des Anwendungsbereichs

- (1) In den repräsentativen vSu ist nach § 7 Absatz 6 Nummer 5 EndlSiUntV keine Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung vorzunehmen.
- (2) Im Unterschied zu Kapitel 2.1 Absatz (3), der sich auf die zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am selben Endlagerbergwerk bezieht, gilt die Berechnungsgrundlage jedoch nicht für die Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in einem separaten Endlagerbergwerk nach § 21 Absatz 2 EndlSiAnfV.

3 Begriffsbestimmungen

Im Sinne der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung sind

1. **Dosisabschätzung**
die Analyse, in deren Rahmen für einen Untersuchungsraum im Bewertungszeitraum die mögliche zusätzliche über die Lebenszeit gemittelte effektive Jahresdosis durch ein potentiell tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle für eine repräsentative Person unter Einbeziehung der Ungewissheiten berechnet wird;
2. **Abfallinventar**
die Aufstellung aller radioaktiven sowie auch nicht radioaktiven Stoffe, die den Abfällen, die für ein potentiell tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle vorgesehen sind, zugerechnet werden;
3. **Radionuklidinventar**
die Aufstellung der radioaktiven Nuklide im Abfallinventar;
4. **Quellterm**
der mathematische Ausdruck, der quantitativ die Freisetzungsrates von radioaktiven Stoffen mit ihrer Zusammensetzung der Isotope aus einem definierten Bereich, z. B. aus einem Abfallprodukt, einem Abfallgebinde, einer Einlagerungskammer oder dem Endlager, beschreibt;
5. **Entwicklung**
die Beschreibung einer potentiellen Entwicklung des Endlagersystems, insbesondere hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation im Untersuchungsraum sowie der Barrieren und der einzulagernden Abfälle ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Bewertungszeitraums;
6. **Ableitung von Entwicklungen**
die systematische Herleitung und Beschreibung potentieller Entwicklungen des Endlagersystems insbesondere hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation im Untersuchungsraum sowie der Barrieren und der einzulagernden Abfälle ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Bewertungszeitraums;
7. **Gruppe von Entwicklungen**
die Zusammenfassung potentieller Entwicklungen zum Zweck der Reduktion der zu betrachtenden Rechenfälle;
8. **Ungewissheit**
der Zustand unvollständiger Kenntnis über ein Phänomen oder einen Sachverhalt, der sich aus einem auflösbaren oder nicht auflösbaren Mangel an Information, aus Unschärfen oder aus unterschiedlichen Auslegungen zu bereits bekannten Informationen ergeben kann;
9. **Ungewissheitsanalyse¹**
Untersucht den aufgrund der Ungewissheiten möglichen Wertebereich der Ergebnisse mit Blick auf sein Ausmaß und seine Grenzen;
10. **Bezugsjahr**
das Kalenderjahr innerhalb des Bewertungszeitraums, für das die effektive Dosis der repräsentativen Person berechnet wird;
11. **Referenzperson**
die hypothetische Person, der für dosimetrische Zwecke altersabhängige

¹ Der Begriff „Unsicherheitsanalyse“ ist ebenfalls gebräuchlich.

standardisierte Eigenschaften zugeschrieben werden und für die zur Berechnung der inneren Exposition durch Radionuklide altersabhängige radionuklidspezifische Dosiskoeffizienten sowie zur Berechnung der äußeren Exposition durch Radionuklide radionuklidspezifische Dosisleistungskoeffizienten und altersabhängige Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie in tabellierter Form vorliegen;

12. **Repräsentative Person²**
die hypothetische Person, der zur Berechnung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung altersabhängige Lebensgewohnheiten, Wirtschaftsweisen und die Nutzung von Ressourcen derart zugeschrieben werden, dass sie für höher exponierte Bevölkerungsgruppen in der jeweiligen Altersgruppe repräsentativ ist, wobei extremes Verhalten ausgeschlossen wird;
13. **Dosiskoeffizient**
die altersabhängige radionuklidspezifische Größe zur Berechnung der inneren Exposition (Folgedosis) infolge Inhalation oder Ingestion von Radionukliden, ausgedrückt in der Einheit Sv·Bq⁻¹;
14. **Dosisleistungskoeffizient**
die radionuklidspezifische Größe zur Berechnung der äußeren Exposition (Dosis oder Dosisleistung) durch Radionuklide, die in Verbindung mit altersabhängigen Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie angewendet wird, ausgedrückt in der Einheit Sv·m²·Bq⁻¹·s⁻¹ bei Gamma-Submersion und Gamma-Bodenstrahlung sowie Sv·m³·Bq⁻¹·s⁻¹ bei Beta-Submersion;
15. **Effektive Dosis**
das Maß für die gesundheitliche Gefährdung des menschlichen Körpers durch ionisierende Strahlung, bei dem die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Arten ionisierender Strahlung sowie die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe und Gewebe des menschlichen Körpers gegenüber so genannten stochastischen Strahlenwirkungen (z. B. Krebs oder Leukämie) berücksichtigt werden, ausgedrückt in der Einheit Sv.

² Der konzeptuelle Unterschied zur Referenzperson besteht darin, dass es bei der *Referenzperson* um standardisierte Eigenschaften des Organismus geht, während bei der *Repräsentativen Person* Festlegungen zum Verhalten vorgenommen werden. Weitere Informationen finden sich in der fachlichen Begründung zum Regeltext und in der Fachliteratur.

4 Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis

4.1 Ziele

- (1) Die Berechnungsgrundlage schafft Voraussetzungen für die Entwicklung einer Methodik zur Quantifizierung der möglichen Austragung von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen und deren Transport in der Geo- und in der Biosphäre. Sie hat das Ziel, zu einer begründeten, nachvollziehbaren und transparenten Abschätzung der zusätzlichen Exposition für den Menschen durch ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zu führen.
- (2) Es wird angestrebt, dass für alle Untersuchungsräume gleichwertige Methoden zur Abschätzung der Dosis verwendet werden, sodass die Dosisabschätzung in allen Sicherheitsuntersuchungen einer Phase des Standortauswahlverfahrens von ähnlicher Qualität ist. Zudem bezwecken die Vorgaben ein übergreifend organisiertes und systematisches Vorgehen, in welchem die für die Dosisabschätzung sensitiven Parameter sowie die relevanten Faktoren und Prozesse identifiziert, berücksichtigt und dokumentiert werden.
- (3) Die Dosisabschätzung als ein Teil der Langzeitsicherheitsanalyse (siehe § 9 Absatz 1 Nummer 3 EndlSiUntV) dient der Absicherung der gesetzlich geforderten Beurteilung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle (§ 1 StandAG).

4.2 Grundsätze

Für die Anwendung der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung gelten folgende Grundsätze:

1. **Geosphärenmodellierung**
Bei der Geosphärenmodellierung wird der Transport ab dem Moment der Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen bis in den für die Dosisabschätzung relevanten Teil der Biosphäre numerisch berechnet. Der Berechnung können konservative, idealisierende, vereinfachende und stilisierende Annahmen zugrunde liegen. Modelle zur Beschreibung der Prozesse in der Geosphäre sind unter Berücksichtigung der relevanten physikalischen und chemischen sowie auch biologischen Gesetzmäßigkeiten und Prozesse zu entwickeln.
2. **Biosphärenmodellierung**
Bei der Biosphärenmodellierung dienen die mithilfe der Geosphärenmodellierung ermittelten Radionuklidausträge aus der Geosphäre als Eingabegrößen und werden für die Berechnung der Abschätzungen der zusätzlichen Exposition der Bevölkerung verwendet.
In der Biosphäre werden die Randbedingungen maßgeblich durch den Menschen sowie durch vergleichsweise schnell und tiefgreifend veränderliche Charakteristika der Biosphäre geprägt. Darüber hinaus können im Laufe des Bewertungszeitraums exogene Prozesse einen großen gestalterischen Einfluss auf die Erdoberfläche und die erdoberflächennahen Schichten haben, die in ihren genauen Ausprägungen schwer zu prognostizieren sind. Über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre sind wissenschaftlich abgesicherte Prognosen über die Lebens- und Wirtschaftsweisen der Menschen nicht möglich. Ähnlich verhält es sich bei der Landschafts- und Klimaentwicklung, wo sich die Ungewissheit über zukünftige Verhältnisse im Untersuchungsraum mit dem betrachteten Zeitraum erhöht.
Die Berechnungsgrundlage beruht daher sowohl auf wissenschaftlichen Grundlagen als auch auf Konventionen dafür, in welcher Art und Weise die

zusätzliche Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung abzuschätzen ist. Dafür werden stilisierte Annahmen getroffen, beispielsweise über zukünftige Lebens- und Wirtschaftsweisen der Bevölkerung.

Sollten relevante Entwicklungen und lokale Gegebenheiten nicht durch das Biosphärenmodell in der Berechnungsgrundlage abgedeckt sein, ist es nach Stand von Wissenschaft und Technik zu erweitern und anzupassen.

3. **Lückenlose Darstellung**

Es ist sicherzustellen, dass der Radionuklidtransport vom Ort der Einlagerung bis zur Exposition des Menschen lückenlos und nachvollziehbar dargestellt und begründet ist.

4. **Strategie zur Dosisabschätzung**

Das Vorgehen bei der Dosisabschätzung im Standortauswahlverfahren ist jeweils übergeordnet zu planen und in einer Strategie festzuhalten, die alle Ebenen des Vorgehens und Inhalte der Dosisabschätzung umfasst.

5. **Qualitätssicherung**

Für den Umgang mit Daten und die Durchführung der quantitativen Analysen und qualitativen Bewertungen im Rahmen der Dosisabschätzung sind qualitätssichernde Maßnahmen vorzusehen und im Qualitätsmanagementsystem festzulegen.

6. **Realitätsnahe Annahmen**

Für die Dosisabschätzung gilt die Vorgabe nach § 9 Absatz 2 EndlSiUntV, dass für die Analyse des Verhaltens des Endlagersystems im Bewertungszeitraum „[...] *hinreichend qualifizierte numerische Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen durchzuführen* [...]“ sind. Im Speziellen bedeutet dies in Hinblick auf Konservativität bzw. Realitätsnähe bei der Abschätzung möglicher zusätzlicher Expositionen Folgendes:

- a. Für die Geosphärenmodellierung sind die numerischen Modellierungen auf Basis wissenschaftlicher Grundlagen und realitätsnaher Annahmen durchzuführen.
- b. Für die Biosphärenmodellierung sind natürliche Prozesse auf Basis wissenschaftlicher Grundlagen und realitätsnaher Annahmen abzubilden. In Bezug auf den Menschen und seine Handlungen werden plausible Annahmen getroffen. Zur Vereinfachung dürfen darüber hinaus abdeckende Annahmen getroffen werden. Daraus entstehende deutliche Überschätzungen der zusätzlichen Exposition sind jedoch zu vermeiden.

7. **Stilisierung von Modellen und Parameter**

Wenn die Unterschiede zwischen verschiedenen Untersuchungsräumen so klein oder die Ungewissheiten in Bezug auf ihre relevanten Eigenschaften so groß sind, dass eine Differenzierung der betrachteten Modelle keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das Ergebnis der Dosisabschätzung erwarten lässt, dürfen stilisierte Modelle und Parameter einheitlich angewendet werden.

8. **Plausible Annahmen**

Falls Prozesse und Endlagerkomponenten in der Zukunft betrachtet werden, für die sich mit dem jeweiligen Kenntnisstand keine belastbaren Aussagen treffen lassen, sind innerhalb der jeweils betrachteten Entwicklung plausible Annahmen zu treffen und zu begründen.

9. **Konsistenz mit der vSu**

Im Rahmen der Dosisabschätzung verwendete Informationen, Annahmen und Vorgehensweisen müssen untereinander sowie auch in Bezug auf alle anderen Analysen, Betrachtungen und Begrifflichkeiten innerhalb der

jeweiligen vSu konsistent sein. Insoweit von der Konsistenz abgewichen werden muss, ist dies explizit auszuweisen. Die Konsistenz der Dosisabschätzung ist in Bezug auf folgende Betrachtungen und Analysen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu beachten:

- a. Die nach § 3 Absatz 2 EndlSiAnfV ermittelten relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am Endlagerstandort.
- b. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle nach § 4 EndlSiAnfV.
- c. Die Integritätsanalysen bzgl. der Barrieren nach §§ 5 und 6 EndlSiAnfV.
- d. Den Ausschluss einer sich selbst tragenden Kettenreaktion nach § 8 EndlSiAnfV.
- e. Die Geosynthese nach § 5 EndlSiUntV.
- f. Das vorläufige Sicherheitskonzept und die vorläufige Auslegung des Endlagers nach § 6 Absatz 1 und 2 EndlSiUntV.
- g. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose nach § 7 Absatz 2 EndlSiUntV in Verbindung mit § 3 Absatz 2 EndlSiAnfV.
- h. Der Umgang mit Ungewissheiten nach § 11 EndlSiUntV.

10. **Stand von Wissenschaft und Technik**

Die angewandten Methoden und Modelle sind im Kontext des jeweiligen Stands von Wissenschaft und Technik zu bewerten. Diese Bewertung ist im Verlauf der vSu fortzuschreiben, der Erkenntnisgewinn darzustellen und in der Weiterentwicklung der Modelle zu berücksichtigen. Die Auswahl der Methoden und Modelle ist unter Abwägung von Alternativen zu begründen.

11. **Radionuklidinventar**

Das für das Endlager vorgesehene Radionuklidinventar ist der Ausgangspunkt jeder Dosisabschätzung und darüber hinaus für alle Untersuchungsräume gleich. Es sind jedoch geringfügige Unterschiede der Inventarzusammenstellung möglich und zulässig, falls bei einem Untersuchungsraum die Einbringung geringer Volumina schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gemäß § 21 Absatz 3 EndlSiAnfV vorgesehen wird und bei einem anderen nicht.

12. **Dokumentation**

Die Nachvollziehbarkeit und Prüfbarkeit der Dosisabschätzung erfordert eine sinnvoll konzipierte und systematische Dokumentation aller verwendeten Unterlagen inklusive Informationen über Zwischenschritte und dabei verworfene Alternativen. Für die Dosisabschätzung sind die Anforderungen nach § 4 Absatz 5 EndlSiUntV in Bezug auf alle zu erstellenden Berichte, Unterlagen und zu dokumentierenden Informationen vollständig zu erfüllen. Es ist eindeutig auf andere Bestandteile der vSu zu referenzieren. Es ist in jedem Fall sicherzustellen, dass sämtliche verwendeten und erstellten Dokumente so in Bezug gesetzt werden, dass die fachliche Nachvollziehbarkeit durch Dritte und die Prüfbarkeit der Abschätzung der zusätzlichen Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung infolge möglicher Austragungen von Radionukliden aus dem Endlager durch die Aufsichtsbehörde gewährleistet sind. Insbesondere die Dokumentation von Informationen über den Modellen zugrunde liegende Annahmen und deren Umsetzung ist entscheidend, damit Dritte allein auf dieser Grundlage die Ergebnisse mit hinreichender Genauigkeit reproduzieren könnten.

5 Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung

(1) Für die Dosisabschätzung ist eine Strategie im Hinblick auf ihre Durchführung anzuwenden. Diese ist zu entwickeln und darzulegen bzw. an eine bestehende Strategie im Rahmen der vSu anzuknüpfen. In Phase 3 des Standortauswahlverfahrens ist sie fortzuführen und gegebenenfalls anzupassen.

(2) Die Strategie dient dazu, das Vorgehen bei der Dosisabschätzung darauf auszurichten, dass mittels eines einheitlichen Vorgehens folgende Ziele erreicht werden:

1. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist die Dosisabschätzung auf Basis eines nachvollziehbaren Vorgehens so auszurichten, dass die Dosisabschätzungen mit vergleichbarer Qualität für alle Untersuchungsräume durchgeführt werden.
2. Die Strategie befasst sich mit Ungewissheiten, um Ergebnisse der Dosisabschätzung mit vergleichbarer Qualität für alle potentiellen Endlagerstandorte erreichen zu können.
3. Es sollen die unterschiedlichen Komponenten (insbesondere Modelle und beeinflussende Erkenntnisse aus anderen Schritten der jeweiligen vSu), ihre Beziehungen untereinander sowie die grundlegenden Prinzipien, welche die Ausgestaltung beeinflussen, beschrieben werden.

(3) Es ist entweder eine Strategie zu verwenden oder ggf. zu entwickeln, die in allen vSu der jeweiligen Phase zur Anwendung kommt, oder es können mehrere Strategien zur Anwendung kommen, die in mehreren vSu zu den jeweiligen Untersuchungsräumen mit ähnlichen Charakteristika oder ähnlichen Sicherheitskonzepten angewendet werden. Im zweiten Fall ist jedoch darzustellen, wie trotz verschiedener Strategien erreicht werden soll, dass die verschiedenen Dosisabschätzungen mit ähnlicher Qualität vorgenommen werden können und somit eine ähnliche Aussagekraft der Ergebnisse zu erwarten ist.

(4) Methodische Ansätze, Schlüsselemente und Inhalte einer Strategie sind insbesondere:

1. Festlegung von und Einbeziehung der bekannten Informationen für die Modellierung,
2. Umgang mit räumlichen, zeitlichen und fachlichen Aspekten mit Relevanz für die Dosisabschätzung,
3. Umgang mit in der Realität gekoppelten Prozessen,
4. Begründung für oder gegen die Verwendung von entsprechenden Kopplungen in den Modellen,
5. Umgang mit Fortschritten des Stands von Wissenschaft und Technik (Mechanismen- und Prozessverständnis, Modellierungsansätze, Berechnungsmodelle, etc.),
6. Einbindung und Rolle von verbal-argumentativen Erläuterungen und Elementen,
7. Ausreichende Berücksichtigung aller relevanten Aspekte (Mechanismen, Prozesse, Komponenten, etc.),
8. Optimierungsprozesse und Abgleich von Modellen (Iteration, Kriterien zum Abbruch etc.),
9. Umgang mit Ungewissheiten (siehe auch Kapitel 8),
10. Sicherung der Qualität von Eingangsdaten und verwendeten Datenbanken sowie der Arbeitsschritte und der Ergebnisse (inklusive Reproduzierbarkeit) und
11. Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.

6 Systematik und Typen von Modellen

6.1 Grundsatz der Typisierung

Zur Strukturierung des Vorgehens und der Modelle ist im Rahmen der Dosisabschätzung eine Typisierung von Modellen in Anlehnung an IAEA (2012) Kapitel 5.47 zu verwenden. Es werden drei aufeinander aufbauende Ebenen der Modellkonkretisierung genannt, die nachfolgend beschrieben werden.

6.2 Konzeptuelle Modelle

(1) Konzeptuelle Modelle beschreiben logisch nachvollziehbar und qualitativ die für den jeweils betrachteten Fall relevanten Prozesse und Komponenten des Endlagersystems einzeln und in ihrem jeweiligen Zusammenwirken.

(2) Der konkrete Inhalt eines konzeptuellen Modells ist fallabhängig. Die Aufgabe jedes konzeptuellen Modells und die Zielstellung sind daher immer anzugeben. Je nach Aufgabe sind mindestens die jeweils zutreffenden der im Folgenden aufgezählten wesentlichen, zu beschreibenden Aspekte zu identifizieren und darzustellen:

1. Modellannahmen und -vereinfachungen (ggf. auch die Ausweisung von Alternativen und der Umgang mit ihnen);
2. Systemgrenzen des Modells, bezüglich
 - a. räumlicher Ausweisung des Berechnungsgebiets,
 - b. betrachteten Zeitraums (ggf. unterschiedlich für verschiedene Prozesse oder Startzeitpunkte) sowie der
 - c. Ausweisung des zulässigen Anwendungsbereichs;
3. Modellrandbedingungen;
4. Räumliche Struktur des Berechnungsgebiets (z. B. Homogenbereiche);
5. Übergabe von Daten und Ungewissheiten an Schnittstellen und Kopplungen zwischen Modellen.

6.3 Mathematische Modelle

Mathematische Modelle beschreiben den Inhalt der konzeptuellen Modelle anhand mathematischer Gleichungen. Neben den notwendigen Gleichungen umfassen sie alle erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen sowie die Festlegung der verwendeten Parameter der Modelle inklusive ihrer Bandbreiten. Mathematische Modelle beinhalten auch numerische Näherungsverfahren, die in Formulierung der mathematischen Gleichungen Eingang gefunden haben.

6.4 Berechnungsmodelle

Die Beschreibung des Berechnungsmodells beinhaltet die Hardware und Software, die zur Lösung des mathematischen Modells, meist mit Hilfe numerischer Verfahren, verwendet wird. Diese umfasst alle Komponenten, die von der Dateneingabe bis zur Darstellung der Ergebnisse notwendig sind, um das mathematische Modell zu lösen. Beispielsweise sind dies Inputfiles, Pre- und Postprocessing sowie räumliche und zeitliche Diskretisierung. Es muss für verwendete Software sowohl die Versionsnummer zur eindeutigen Identifikation als auch eine zugehörige Dokumentation angegeben werden.

7 Potentielle Entwicklungen des Endlagers

(1) Die Berechnungsgrundlage basiert darauf, dass potentielle Entwicklungen des Endlagersystems gemäß §3 EndlSiAnfV mit einer systematischen, transparenten und nachvollziehbaren Methode unter Berücksichtigung der grundlegenden Empfehlungen von insbesondere IAEA (2012), IAEA (2011), sowie Smith et al. (2016) abgeleitet werden. Grundlage für die Ableitung von Entwicklungen sind die Vorgaben in §3 EndlSiAnfV (Bewertungszeitraum; Entwicklungen des Endlagersystems) für die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen.

(2) Die Ableitung von Entwicklungen bildet die methodische Grundlage für die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers nach seinem Verschluss einschließlich der Bewertung der möglichen Folgen für den Menschen durch den Austrag von Radionukliden aus dem Endlager. Die Ableitung von Entwicklungen ist der Dosisabschätzung verfahrenstechnisch voranzustellen. In diesem Kapitel werden nochmals wesentliche Grundlagen für die Ableitung von Entwicklungen für die Zwecke der Dosisabschätzung benannt.

(3) Eine gängige Möglichkeit ist es, die relevanten Entwicklungen des Endlagersystems mit Hilfe eines FEP-Katalog (aus dem Englischen *features, events and processes*), z. B. jeweils aktueller FEP Katalog der OECD-NEA (Capouet et al. 2019)) zu ermitteln und zu beschreiben. Die abgeleiteten Entwicklungen werden nach § 3 Absatz 2 EndlSiAnfV in „zu erwartende“ und „abweichende“ Entwicklungen eingeordnet.

(4) Es ist nachvollziehbar darzustellen, wie die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen in den verwendeten Modellen (Kapitel 6) abgebildet und parametrisiert werden. Verwendete Eigenschaften und Parameter sind darzustellen und unter Berücksichtigung der Alternativen zu begründen. Für die Umsetzung in Rechenfälle zur Dosisabschätzung ist sicherzustellen, dass die einzelnen ermittelten zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren in sich widerspruchsfrei und in Bezug auf die potentielle Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager umfassend sind.

(5) Aufgrund einer möglichen Vielzahl an ermittelten Entwicklungen ist es zulässig, Entwicklungen in Gruppen zusammenzufassen. Geschieht dies, dann ist zu begründen, warum davon ausgegangen werden kann, dass die für die Ermittlung der zusätzlichen Exposition gewählte Entwicklung für alle Entwicklungen innerhalb einer Gruppe von Entwicklungen in Bezug auf die berechnete Dosis abdeckend ist. Auch die für die Gruppe von Entwicklungen stellvertretend analysierte Entwicklung ist gemäß dem Schema nach § 3 EndlSiAnfV einzuordnen, wobei die Einordnung zu begründen ist.

(6) Die Dosisabschätzung für eine Entwicklung muss dann nicht explizit numerisch erfolgen, wenn auf Basis fachlicher Analysen plausibel begründet werden kann, dass diese Entwicklung zu einer niedrigeren zusätzlichen Exposition als eine andere Entwicklung führt, für die bereits nachgewiesen wurde, dass die Grenzwerte eingehalten werden.

8 Umgang mit Ungewissheiten

8.1 Übergeordnete Vorgaben

- (1) Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist gemäß § 11 EndSiUntV eine Bewertung der Ungewissheiten im Bewertungszeitraum vorzunehmen, was die Dosisabschätzung mit einschließt. Die Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten bei der Dosisabschätzung werden in der Berechnungsgrundlage konkretisiert.
- (2) Die Anforderungen an die Betrachtung von Ungewissheiten in Kapiteln 8.2 bis 8.3 gelten für die in den Kapiteln 9 bis 12 behandelten Bereiche. Besonderheiten für die Biosphärenmodellierung sind in Kapitel 8.4 beschrieben.
- (3) Die reduzierbaren und die nicht-reduzierbaren Anteile der Ungewissheiten sind zu identifizieren und es ist darzulegen, in welchem Maß die Zuverlässigkeit der Dosisabschätzung durch weitere Reduktion der Ungewissheiten erhöht werden kann. Mögliche Auswirkungen auf die zu berechnenden Dosiswerte durch solche Einschränkungen sind in ihrer Tendenz und in ihrem Ausmaß abzuschätzen und begründet darzustellen.
- (4) Die nach Kapitel 5 zu erstellende Strategie umfasst auch den Umgang mit den Ungewissheiten für die Dosisabschätzung. Die Strategie behandelt mindestens die in Kapitel 8.2 genannten Aspekte und legt insbesondere einheitliche Bewertungsmaßstäbe für die Aussagekraft der Daten und Modelle fest. Dies schließt die Bewertungsmaßstäbe für die notwendigen Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen nach Kapitel 8.3 mit ein. Weiterhin behandelt die Strategie die Minimierung der Ungewissheiten bei der Dosisabschätzung und Abbruchskriterien für weitere Minimierungsbestrebungen.
- (5) Zusammenhänge zwischen Modellparametern, Modellannahmen und Modellstrukturen sind bei der Betrachtung der Ungewissheiten zu berücksichtigen. Auswirkungen auf Berechnungsergebnisse, die mit möglichen Kopplungen von Berechnungsmodellen verbunden sind, sind soweit wie möglich zu quantifizieren.

8.2 Spezifische Vorgaben

8.2.1 Informationsquellen

Die zur Abschätzung der Dosis herangezogenen Informationen sind mit den zugehörigen Ungewissheiten vollständig und nachvollziehbar darzustellen. Daher ist für jeden Untersuchungsraum eine Liste mit den verwendeten Informationsquellen zu führen, die Qualität der einzelnen Quellen zu bewerten und diese zu dokumentieren.

8.2.2 Qualität der Daten und Auswahl der Modelle

- (1) Die Qualität im Sinne von Belastbarkeit und Güte der herangezogenen Daten ist zu bewerten und in der Diskussion der Berechnungsergebnisse zu berücksichtigen. Diskussionspunkte sind z. B. die Reproduzierbarkeit von Messungen, die Zuverlässigkeit von Messinstrumenten oder der Grad an Diskordanz zwischen Expert:innen.
- (2) Einschätzungen von Expert:innen sollen bezüglich Erfahrungshintergrund und Qualifikation der Expert:innen transparent gemacht werden. Eine Abgrenzung zu anderen Informationen aus qualitätsgesicherten Quellen (Fachliteratur) ist deutlich zu machen.
- (3) Die verwendeten Modellansätze und insbesondere die Komplexität der Modelle müssen im Hinblick auf den Zweck der Dosisabschätzung und die

Qualität der verwendeten Daten angemessen sein. Die Auswahl der verwendeten Modellansätze ist z. B. auf objektive Kriterien der statistischen Analyse oder Einschätzungen von Expert:innen abzustützen. Sind mehrere Modellansätze zur Abbildung eines Prozesses ähnlich gut geeignet, so sind diese bei der Dosisabschätzung zu diskutieren und die getroffene Auswahl ist nachvollziehbar zu begründen (siehe hierzu auch Kapitel 10.3).

8.2.3 Qualitätssicherung und Vermeidung von Fehlern

(1) Im Rahmen der Dosisabschätzung sind qualitätssichernde Maßnahmen vorzusehen und im Managementsystem festzulegen. Dies dient zur Vermeidung und Minimierung von Fehlern bei der Durchführung der Dosisabschätzung, um ein Höchstmaß an Vertrauen in die Qualität der Berechnungen zu schaffen. Dabei sind die Identifizierung, Überprüfung und Weiterentwicklung dieser qualitätssichernden Maßnahmen als prioritär anzusehen.

(2) Die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen ist mit Blick auf den Einfluss auf die Dosisabschätzung zu bewerten. Wo Maßnahmen getroffen werden, deren Auswirkung nicht quantitativ beschreibbar sind, ist ihr Einfluss auf die Dosisabschätzung abzuschätzen und qualitativ zu diskutieren.

8.2.4 Plausibilität von Daten

(1) Für alle verwendeten Daten ist jeweils ein plausibler Wertebereich abzugrenzen. Die Abgrenzung ist zu begründen und mit Blick auf die Dosisabschätzung zu bewerten.

(2) Der plausible Wertebereich ist weiter in Bereiche mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zu unterteilen, wenn dies aufgrund des Kenntnisstands gerechtfertigt und aufgrund der Sensitivität auf die berechneten Dosiswerte erforderlich ist. Die Zuweisung von diskreten Wahrscheinlichkeiten für Teile des plausiblen Wertebereichs bzw. die Auswahl von kontinuierlichen Verteilungsfunktionen über den plausiblen Bereich ist auf die Informationsgrundlage und auf die Anforderungen der in der Ungewissheits- und Sensitivitätsanalyse gemäß Kapitel 8.3 verwendeten statistischen Methoden abzustimmen.

8.2.5 Berücksichtigung von Abhängigkeiten

Soweit möglich sind statistisch voneinander abhängige Größen in der Dosisabschätzung zu berücksichtigen. Die Ungewissheit bezüglich der Abhängigkeit (beispielsweise die Bandbreite des Korrelations- oder Regressionskoeffizienten) ist ebenfalls auszuweisen und bei der Dosisabschätzung zu berücksichtigen.

8.2.6 Zusammenführung und Übertragung von Information

(1) Die Zusammenführung von Informationen und zugehörigen Ungewissheiten aus verschiedenen Quellen ist konsistent durchzuführen und nachvollziehbar darzustellen. Unterschiedliche Gewichtungen herangezogener Informationen sind in ihrer Auswirkung zu begründen.

(2) Durch die Zusammenführung entstehende Ungewissheiten sind auszuweisen und bei der Dosisabschätzung zu berücksichtigen. Hierzu können neben formalen Methoden (beispielsweise Bayessche Statistik) auch Einschätzungen von Expert:innen angewendet werden.

(3) Die Übertragung von Informationen und zugehörigen Ungewissheiten über Raum, Zeit und Skalen ist nachvollziehbar darzustellen. Dies betrifft beispielsweise die Anwendung von Informationen, die nicht aus dem jeweiligen Untersuchungsraum stammen, die Extrapolation von Daten in die Zukunft und die Skalierung zwischen Labor- und Feldmaßstab. Durch die Übertragung

entstehende Ungewissheiten sind auszuweisen und bei der Dosisabschätzung zu berücksichtigen.

8.3 Ungewissheits- und Sensitivitätsanalyse

(1) Ungewissheitsanalysen quantifizieren die Ungewissheit des Berechnungsergebnisses. Sensitivitätsanalysen dienen dazu zu identifizieren, welche Parameter das Berechnungsergebnis in welchem Umfang beeinflussen.

(2) Die Ungewissheit des jeweiligen Analyseergebnisses ist zu quantifizieren. Hierfür sind

1. die Parameter (Anfangs- und Randbedingungen sowie Modellparameter) und Modelle zu identifizieren, die die Ungewissheiten wesentlich beeinflussen;
2. die gemäß dem aktuellen Kenntnisstand vorhandenen Bandbreiten der identifizierten Parameter zu quantifizieren, bei Einsatz von statistischen Verfahren mitsamt den Verteilungen der Parameter;
3. falls erforderlich, Abhängigkeiten oder Wechselwirkungen zwischen einzelnen Eingangsparametern festzustellen und zu berücksichtigen.

(3) Zur Ermittlung der Ungewissheiten bezüglich der berechneten Dosis können deterministische und probabilistische Berechnungen durchgeführt werden. Die Einhaltung von Kriterien, die sich aus Vorüberlegungen zur Erstellung der Strategie aus Kapitel 5 ergeben oder daraus abgeleitet werden, muss unter Berücksichtigung der Ungewissheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls durch das numerische Verfahren resultierende Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.

(4) Zur Beurteilung der Sensitivität der abgeschätzten Dosis auf die herangezogenen numerischen Daten können grafische und quantitative Methoden komplementär angewendet werden. Es sind sowohl die lokale Sensitivität der Dosiswerte aus der deterministischen Analyse als auch die globale Sensitivität von verwendeten Daten zu ermitteln. Der Begriff global bezieht sich dabei auf den insgesamt plausiblen Bereich der herangezogenen Daten, der Begriff lokal auf einen konkreten Ort in diesem Bereich.

8.4 Besonderheiten der Biosphärenmodellierung

(1) Bei der Biosphärenmodellierung darf auf Betrachtungen zu den Ungewissheiten der Modellkonzepte und Modellparameter und deren Konsequenzen für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung verzichtet werden. Während bei der Geosphäre die Entwicklungen über den Bewertungszeitraum im Wesentlichen prognostizierbar sind, endet bei der Biosphäre hingegen die Möglichkeit einer gesicherten Vorhersage der Entwicklung spätestens nach wenigen Zehntausend Jahren. Die Lebens- und Wirtschaftsweisen des Menschen sind selbst über wenige Jahrzehnte nicht gesichert zu prognostizieren. Deswegen muss auf stilisierte Biosphären und bei vielen Modellgrößen (z. B. Lebensgewohnheiten, Wirtschaftsweisen) auf plausible Annahmen zurückgegriffen werden. Die grundlegenden Annahmen zur Biosphärenmodellierung, die Strukturen der radioökologischen Modelle und die Modellparameter sind soweit wie möglich vorgegeben. Aufgrund dieser weitgehenden Festlegungen würden Betrachtungen zu Ungewissheiten im Widerspruch zum modellhaften Ansatz der Berechnungen für die Biosphäre stehen. Im Zuge der Erstellung der Biosphärenmodellierung wurde bereits umfassend geprüft, dass durch die Wahl der Modellstrukturen, der Modellparameter und der Modellannahmen keine Unterschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person zu erwarten ist (Konservativitätsbetrachtungen).

(2) Abgesehen von kühlgemäßem Klima, für das die vorliegende Berechnungsgrundlage Modellparameter enthält, ist die Parametrisierung der radioökologischen Modelle an die jeweiligen klimatischen Gegebenheiten im Untersuchungsraum anzupassen. Für die klimaabhängigen Modellparameter sowie für die Parameter von Modellen, die der:die Vorhabenträger:in selbst entwickelt oder von dieser Berechnungsgrundlage abweichend einsetzt, sind probabilistische und deterministische Sensitivitätsanalysen (Parameter-Sensitivitätsanalysen) durchzuführen. Ziel ist es, den Einfluss variierender Parameterwerte auf die Dosisabschätzung zu quantifizieren. Hierbei sind alle aus dem Endlager ausgetragenen Radionuklide zu berücksichtigen, deren Beitrag zur zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person nicht vernachlässigt werden darf. Bei probabilistischen Sensitivitätsanalysen ist insbesondere auch die Belastbarkeit der gewählten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen und der Korrelationen der Modellparameter zu erläutern. Als Ergebnis der Parameter-Sensitivitätsanalysen sind für die jeweiligen klimatischen Gegebenheiten feste Parameterwerte zu wählen und zu begründen, die der Biosphärenmodellierung zugrunde zu legen sind. Für kühlgemäßes Klima sind die Modellparameter explizit vorgegeben. Da sie aus bestehenden, umfassend geprüften Berechnungsgrundlagen entnommen, gegebenenfalls aktualisiert und an die Erfordernisse der Biosphärenmodellierung bei der Endlagerung angepasst wurden, erübrigen sich in diesem Fall Parameter-Sensitivitätsanalysen.

(3) Ungeachtet der geforderten Parameter-Sensitivitätsanalysen ist die Biosphärenmodellierung deterministisch durchzuführen, wobei für die Modellparameter plausible Punktschätzer heranzuziehen sind, deren Festlegung zu begründen ist.

9 Radionuklidinventar und Auswahlprozess

- (1) Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen sind gemäß § 27 Absatz 3 StandAG (sowie § 4 Absatz 2 EndlSiUntV) auf der Grundlage abdeckender Annahmen zu Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle durchzuführen. Für die Dosisabschätzung ist das gesamte im Endlager vorgesehene, mit den Abfällen einzubringende Radionuklidinventar mitsamt der Zerfallsketten und dem Aufbau von Tochternukliden zu berücksichtigen. Dies beinhaltet auch das Radionuklidinventar aus vergleichsweise geringen Volumina schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gemäß § 21 Absatz 3 EndlSiAnfV, falls die Einlagerung solcher Abfälle in Betracht gezogen wird.
- (2) Für die Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung ist das Abfallinventar vollständig und radionuklidspezifisch zu spezifizieren und unter Angabe sämtlicher hierfür verwendeter Informationsquellen in geeigneter Weise nachvollziehbar zu dokumentieren.
- (3) Für die Kontamination der Biosphäre und die daraus resultierende zusätzliche Exposition der repräsentativen Person sind alle Radionuklide zu berücksichtigen, die aus dem Endlager ausgetragen werden und in die Biosphäre gelangen. Aus den Abfällen hervorgehende radioaktive Zerfallsprodukte sind zu berücksichtigen und darauf aufbauend auch die Veränderung der nuklidspezifischen Zusammensetzung des Abfallinventars über den Bewertungszeitraum. Auf Basis dieses wirtsgesteins- und standortunabhängigen Radionuklidinventars sind die für eine Dosisabschätzung erforderliche Geosphären- und Biosphärenmodellierungen durchzuführen.
- (4) Die bei dem:der Vorhabenträger:in zum Zwecke der Dosisabschätzung verwendeten und ggf. zusätzlich gesammelten Informationen über das Abfall- und Radionuklidinventar müssen *für die Dosisabschätzung nachvollziehbar dokumentiert sein*.
- (5) Die Auswahl der zu berücksichtigenden Radionuklide darf zur Durchführung der Modellierungen für die Dosisabschätzung eingeschränkt werden, sofern dadurch die abgeschätzte zusätzliche Dosis nicht wesentlich verändert wird. Kriterien für die Bewertung der Wesentlichkeit sind anzugeben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Radionuklide nur dann außer Acht gelassen werden dürfen, wenn schlüssig nachgewiesen wird, dass die Beiträge der nicht betrachteten Radionuklide und deren Tochternuklide zur zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person vernachlässigt werden können. Hierbei ist zu beachten, dass kurzlebige Radionuklide nicht nur im initialen Radionuklidinventar existieren, sondern auch durch ein langlebiges Mutternuklid nachgebildet werden können. Bei Zerfallsreihen darf die Verringerung der Aktivität langlebiger Radionuklide während kurz andauernder Transportprozesse vernachlässigt werden, sofern dem Aufbau von Tochternukliden Rechnung getragen wird.
- (6) Jede Nichtberücksichtigung eines Radionuklids aus dem Radionuklidinventar in den Berechnungen der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung ist zu dokumentieren und unter Angabe des Grundes für den Ausschluss nachvollziehbar zu begründen. Das konkrete Vorgehen sowie die angewendeten Kriterien bei der Auswahl der Radionuklide und die Implementierung der Radionuklide in die Modelle zur Lösung der Rechenfälle für die Dosisabschätzung sind darzustellen und zu begründen.
- (7) Nicht radioaktive Nuklide und chemische Verbindungen aus dem Abfallinventar können die Mobilität und den Transport der Radionuklide beeinflussen. Daher sind die formulierten Anforderungen an die Auswahl der relevanten Radionuklide für die Durchführung der Dosisabschätzung nicht allein maßgebend für die

Betrachtung des Abfallinventars. Solche nicht radioaktiven Stoffe und chemische Verbindungen sind zu identifizieren und zu berücksichtigen. Die Identifikation von, der Umgang mit und die Implementierung in die Modellierungen von solchen Stoffen sind darzustellen und zu begründen.

10 Geosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung

10.1 Übergeordnete Aspekte der Geosphärenmodellierung

- (1) Die Geosphärenmodellierung analysiert die ermittelten zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen mit Auswirkungen auf die Ausbreitung von Radionukliden im Bereich der Geosphäre quantitativ. Dafür sind die ermittelten relevanten Prozesse und Komponenten des Endlagersystems für eine Umsetzung in Modellen zu evaluieren und, falls notwendig, begründet zu ergänzen oder zu vereinfachen.
- (2) Der Geosphärenmodellierung liegen die Geosynthese, die geowissenschaftliche Langzeitprognose sowie die Ableitung von Entwicklungen zugrunde. Darüber hinaus sind insbesondere die vorläufige Auslegung des Endlagers, das vorläufige Sicherheitskonzept, die Integritätsanalysen und das Abfallinventar als zentrale Eingangsparameter zu berücksichtigen. Dabei ist der Grundsatz der Konsistenz einzuhalten (siehe Grundsatz Nr. 9).
- (3) Alle Sicherheitsfunktionen von geologischen und (geo-)technischen Komponenten, die zur Retention von Radionukliden beitragen, müssen in Bezug auf ihre gegebenenfalls zeitabhängige Funktionstüchtigkeit in der betrachteten Entwicklung analysiert und bewertet werden.
- (4) In den numerisch zu betrachtenden komplexen Systemen sind alle relevanten Einflüsse zu berücksichtigen. Zur Bewertung der Ungewissheiten sind adäquate statistische Verfahren zu verwenden. Es dürfen verwendete Berechnungsmodelle gegenüber dem technisch maximal Machbaren vereinfacht werden. Vereinfachungen sind nur insoweit zulässig, dass sie der sachgerechten Beantwortung der jeweiligen Fragestellung dienen und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.
- (5) Bei der Vereinfachung von mathematischen Modellen und Berechnungsmodellen sind folgende Anforderungen zu erfüllen:
 1. Alle Vereinfachungen müssen nachvollziehbar begründet und ihre Auswirkungen beschrieben werden, wenn möglich quantitativ.
 2. Falls analytisch oder technisch anspruchsvollere mathematische Modelle aufgrund von Zielkonflikten nicht implementiert werden können oder sollen, muss dies bei der Begründung der Vereinfachung berücksichtigt werden.
 3. Es ist darauf zu achten, dass im Modell Prozesse oder Komponenten des Endlagersystems nicht mehrfach berücksichtigt werden.

10.2 Modellbildung

10.2.1 Elemente der Modellbildung

- (1) Die einzelnen Typen von Modellen sind in Kapitel 6 dargelegt. Für die Modellbildung auf der konzeptuellen Ebene werden folgende Elemente eingeführt und beschrieben:
 1. Quelle und Darstellung möglicher Radionuklidaustragungen (Kapitel 10.2.3),
 2. Modelle der Mobilisierung von Radionukliden (Kapitel 10.2.4),
 3. Modelle des Transports von Radionukliden (Kapitel 10.2.5) und
 4. Modelle für weitere Prozesse zur Unterstützung der Modelle für Mobilisierung und Transport in der Geosphäre (Kapitel 10.2.6).

(2) Radionuklide können erst transportiert werden, wenn sie mobilisiert wurden. Es sind Modelle zu entwickeln oder auszuwählen und anzuwenden, welche die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden beschreiben und dabei Auswirkungen von Prozessen im Berechnungsgebiet berücksichtigen, die Einfluss auf die Ausbreitung von Radionukliden auf ihrem gesamten Transportpfad haben.

(3) Die Mobilisierung und der Radionuklidtransport durch die Geosphäre sind quantitativ zu beschreiben. Dafür sind geeignete Modelle, sowie Modelle zur Berücksichtigung weiterer Prozesse, zu entwickeln oder auszuwählen und anzuwenden. Mit deren Hilfe können detailliert relevante Reaktionsmechanismen und Prozesse analysiert werden. Dieses ermöglicht die Quantifizierung der Mobilisierung und des Transports von Radionukliden sowie der beeinflussenden Prozesse.

(4) Um die Analyse von Mobilisierung und Transport bestmöglich durchführen zu können, wird die Anzahl der Modelle auf den unterschiedlichen Ebenen „konzeptuelles Modell“, „mathematisches Modell“ und „Berechnungsmodell“ nicht begrenzt.

10.2.2 Methodische Grundlagen

(1) Die Geosphärenmodellierung erfordert die Analyse und Interpretation der einzelnen Komponenten des Endlagersystems und seiner Umgebung, deren Eigenschaften sowie Wechselwirkungen im Bewertungszeitraum. Diese Aspekte werden zumindest teilweise im Rahmen anderer Untersuchungen, insbesondere durch die Ableitung von Entwicklungen, identifiziert. Eine Berücksichtigung im Rahmen der Modellierungen für die Dosisabschätzung erfordert jedoch die Übertragung in Modelle. Wesentliche Inhalte der durchzuführenden Analysen für die Dosisabschätzung sind insbesondere die Analyse der regionalen hydrogeologischen Situation, die Analyse der lokalen hydrogeologischen Situation, die Analyse der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Komponenten des Endlagersystems im Bewertungszeitraum und die Analyse des geochemischen Milieus.

Regionale hydrogeologische Situation

(2) Die *regionale* hydrogeologische Situation muss dargestellt und modelliert werden, um daraus eine initiale Abschätzung des zu betrachtenden Gebietes für die Radionuklid Ausbreitung zu erhalten. Ebenfalls werden daraus die Randbedingungen für die Modellierung der *lokalen* hydrogeologischen Verhältnisse abgeleitet.

(3) Alle im Untersuchungsraum vorkommenden Grundwasserleiter und Grundwassernichtleiter müssen adäquat abgebildet werden, sodass ein zum Zweck der Dosisabschätzung notwendiges hydrogeologisches Verständnis des Endlagersystems und seiner Umgebung erreicht wird. Das zu erstellende Grundwassermodell liefert wesentliche Informationen, unter anderem Informationen über Wasserdargebot und Exfiltrationszonen, welche für die Bestimmung der Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell (Kapitel 11) im jeweiligen Untersuchungsraum zu berücksichtigen sind.

(4) Das Grundwassermodell ist bei der Bestimmung des geochemischen Milieus zu berücksichtigen. Es findet darüber hinaus Eingang in Überlegungen zur Nutzbarkeit von Grundwasser aus dem Endlagersystem und umfasst die notwendigen Betrachtungen zur Modellierung des Transports gasförmiger Radionuklide.

Lokale hydrogeologische Situation

(5) Die Modellierung der *lokalen* hydrogeologischen Situation ist anzuwenden, um im Bereich erwarteter Radionuklidfahnen im Grundwasser beziehungsweise in der Gasphase eine feinere Diskretisierung als bei der Modellierung der regionalen hydrogeologischen Situation umzusetzen sowie Betrachtungen von

kleinräumig heterogenen Fließsystemen vorzunehmen und um spezifische Prozesse effizienter zu analysieren.

(6) Die lokalen hydrogeologischen Modelle sind darzustellen, ebenso wie ihre Anwendungsfälle und die daraus resultierenden Ergebnisse.

Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Komponenten des Endlagersystems

(7) Im Rahmen der Dosisabschätzung sind relevante physikalische und chemische Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Komponenten des Endlagersystems zu berücksichtigen, beispielsweise zwischen Abfällen und Barrieren, zwischen technischen und geotechnischen Barrieren untereinander oder zwischen technischen und geotechnischen Barrieren sowie anderen eingebrachten Baustoffen und anstehendem Gestein. In diese Analyse sind insbesondere gebirgsmechanische Spannungen und das geochemische Milieu miteinzubeziehen.

Geochemisches Milieu

(8) Das geochemische Milieu bestimmt die Mobilität vieler Radionuklide in der Geosphäre maßgeblich und muss bekannt sein, um chemisch bedingte Veränderungen der Barrieren sowie Rückkopplungen auf das geochemische Milieu zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist die Beschreibung des geochemischen Milieus im Endlagersystem im Rahmen der Dosisabschätzung vorzunehmen. Sie umfasst physikalische, chemische sowie biologische Parameter und insbesondere die Ermittlung der relevanten gelösten Elementkonzentrationen sowie pH-Bereiche unter Angabe der das geochemische Milieu bestimmenden Festphasen und Redoxpaare sowie gegebenenfalls weitere relevante Einflussgrößen und Gleichgewichte im Bewertungszeitraum.

10.2.3 Quelle und Darstellung möglicher Radionuklidaustragungen

(1) Die Quelle möglicher Radionuklidaustragungen muss unter Berücksichtigung der relevanten Ausgangs- und Randbedingungen sowie der beeinflussenden Prozesse in einem konzeptuellen Modell dargestellt werden. Auf dieser Grundlage wird der Quellterm aufgestellt und liefert als Ergebnis Freisetzungsraten für das berücksichtigte Radionuklidinventar aus einem definierten Bereich des Endlagers. Zu dessen Herleitung müssen verschiedene Annahmen getroffen werden.

(2) Die so ermittelbaren Radionuklidströme gehen mitsamt den zugehörigen Ungewissheiten als Eingangsgröße in die sich räumlich anschließende Modellierung des Bereichs, durch den der Transport der Radionuklide erfolgen wird, ein.

(3) Es ist darzustellen, an welcher Stelle in den Modellen die räumlichen Betrachtungsgrenzen für die mathematische Formulierung angesetzt werden.

(4) Über die Darstellung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung als Gesamtergebnis der Dosisabschätzung hinaus sind die Radionuklidströme zu bestimmen. Dafür sind mitsamt den zugehörigen Ungewissheiten zu ermitteln und darzustellen:

1. die Radionuklidströme über den geometrischen Rand des Bereichs, für den der Quellterm aufgestellt wurde, des Weiteren
2. die Radionuklidströme aus den technischen und geotechnischen Barrieren,
3. die Radionuklidströme aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren hinaus (Bezug zu Austragungsindikatoren §4 Absatz 4 der EndlSiAnfV), sowie
4. die auf Basis der Geosphärenmodellierung berechneten Radionuklidströme an der Schnittstelle Geosphäre-Biosphäre.

10.2.4 Modelle der Mobilisierung von Radionukliden

(1) Die modelltechnische Umsetzung der Mobilisierung von Radionukliden bildet diejenigen Prozesse ab, die unter den jeweiligen thermischen, chemischen, hydraulischen, biologischen und (geo-)mechanischen Bedingungen dazu führen können, dass immobile Radionuklide mobil werden. Bereits im intakten Endlagerbehälter liegt ein Teil der Radionuklide in mobiler Form vor und ist ab dem Zeitpunkt, ab dem die Integrität der Behälter nicht mehr vorausgesetzt wird, direkt transportierbar. Dieses bedeutet, dass dann der Anteil der Radionuklide als mobil gilt, der zu diesem Zeitpunkt oder ohne größeren zeitlichen Verzug prinzipiell durch advektiven oder diffusiven Transport in der flüssigen oder gasförmigen Phase transportiert werden kann. Die weitere Mobilisierung des zum jeweils betrachteten Zeitpunkt noch immobilen Teils der Radionuklide ist im gesamten Bewertungszeitraum zu berücksichtigen. Eine konkrete Beschreibung der Prozesse, welche die Mobilisierung initiieren, unterstützen oder behindern, ist vorzunehmen.

(2) Die Analyse der Mobilisierung der Radionuklide für die Dosisabschätzung basiert auf der Abbildung relevanter Prozesse in Modellen und berücksichtigt bei der Aufstellung der Modelle insbesondere die folgenden Aspekte:

1. Alteration, Korrosion und Auflösung aller potentiell relevanten Stoffe der Endlagergebände und eventuell anderer Prozesse, welche zu einer Mobilisierung von Radionukliden führen. Dies betrifft unter anderem vorhandene Abfallmatrices (z. B. UO_2 -Matrix oder Glasmatrix) und aktivierte Materialien,
2. Bildung von radioaktiven Gasen.

(3) Sobald die Integrität eines Behälters verletzt ist, ist davon auszugehen, dass Fluide, soweit vorhanden, ein- und austreten können. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist bei Vorhandensein von Fluiden von einer Korrosion der Hüllrohre und Abfallmatrices auszugehen.

(4) Für diejenigen Radionuklide, die erst mit größerer zeitlicher Verzögerung nach Versagen des Behälters in die Flüssig- oder die Gasphase gehen, sind Freisetzungsraten unter den jeweiligen Bedingungen zugrunde zu legen und zu begründen. Beeinflussende Effekte, insbesondere der pH-Wert und das Redoxmilieu, sind zu berücksichtigen.

(5) Weitere, die Mobilisierung von Radionukliden potentiell beeinflussende Prozesse und Eigenschaften, wie beispielsweise die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse, die Bildung von Sekundärphasen oder Radiolyseeffekte sind ebenfalls zu berücksichtigen. Schnittstellen zu und zwischen den Modellen sind auszuweisen und Kopplungen, wo zutreffend, zu berücksichtigen.

(6) Die mögliche Remobilisierung von Radionukliden, welche bereits einmal mobilisiert, transportiert und wieder immobilisiert (zum Beispiel durch Prozesse wie Ausfällung oder Sorption) wurden, ist in den Modellen in Betracht zu ziehen.

10.2.5 Modelle des Transports von Radionukliden

(1) Die modelltechnische Umsetzung des Radionuklidtransports bildet diejenigen Prozesse ab, die dazu führen können, dass mobilisierte Radionuklide im Endlagersystem transportiert werden und dadurch potentiell in die Biosphäre gelangen können. Hierbei sind die jeweiligen thermischen, chemischen, hydraulischen, biologischen und (geo-)mechanischen Bedingungen zu berücksichtigen. Der Transport durch potentiell vorhandene oder neu entstehende Wegsamkeiten in den geologischen Einheiten sowie entlang des verfüllten und verschlossenen Systems von Strecken, Schächten, Bohrlöchern und sonstigen Auffahrungen aus

Errichtung und Betrieb des Endlagers einschließlich der technischen und geotechnischen Barrieren ist abzubilden und zu bewerten.

(2) Der Transport von Radionukliden in oder mit der flüssigen Phase und in oder mit der Gasphase ist zu betrachten. Folglich ist neben der direkten Gasbildung durch radioaktiven Zerfall auch die Gasbildung durch korrosive, mikrobielle oder radiolytische Prozesse sowie die mögliche Gasspeicherung im Endlagersystem zu bewerten. Es sind auch Strömungs- und Transportvorgänge in der flüssigen Phase an Materialgrenzflächen zu berücksichtigen. Sollten diese keinen relevanten Beitrag leisten, ist dies zu begründen. Die Modellierung des Transports von Radionukliden innerhalb der Geosphäre hat die geometrischen, die hydraulischen und die sonstigen, den Transport beeinflussenden Eigenschaften der Geosphäre und aller Komponenten des Endlagers im Berechnungsgebiet zu berücksichtigen.

(3) Für die Modelle des Radionuklidtransports sind insbesondere die folgenden Prozesse und Aspekte zu berücksichtigen:

1. Advektiver, diffusiver und dispersiver Radionuklidtransport.
2. Bedingungen, welche die Mobilität von Radionukliden befördern oder gegebenenfalls anderen Rückhalte Mechanismen entgegenwirken wie beispielsweise die Anwesenheit oder Bildung von Kolloiden, Aerosolen oder Komplexbildnern.
3. Rückhalteprozesse für Radionuklide (insbesondere Sorption), insofern deren Wirksamkeit zum betrachteten Zeitpunkt begründet erwartet werden kann.

(4) Schnittstellen zu und zwischen Bereichen unterschiedlicher Modellierung des Radionuklidtransports sind auszuweisen und Kopplungen, wo zutreffend, zu berücksichtigen.

(5) Den zunehmenden Ungewissheiten bei langen Bewertungszeiträumen sowie größeren exogenen Einflüssen auf geologische und hydrogeologische Eigenschaften des Untergrundes in geringerer Tiefe ist mit Blick auf die Komplexität der angewendeten Modelle Rechnung zu tragen:

1. Die für den Radionuklidtransport relevanten Eigenschaften der geologischen und (geo-)technischen Komponenten des Berechnungsgebiets sind gemäß der jeweils betrachteten Entwicklung zu beschreiben und zu verwenden.
2. Müssen Daten oder Parameter ermittelt werden, welche nicht direkt aus der jeweiligen Entwicklung hervorgehen, sind diese in Einklang mit der jeweiligen Entwicklung herzuleiten.
3. Es ist sicherzustellen, dass bei der Berücksichtigung und Implementierung von Prozessen mit retardierender Wirkung auf den Transport von Radionukliden die Wirksamkeit des jeweiligen Prozesses betrachtet und ausgewiesen wird.

10.2.6 Unterstützende Modelle für weitere Prozesse

(1) Die mathematische und numerische Analyse der potentiellen Ausbreitung von Radionukliden in der Geosphäre erfordert, neben der Abbildung der Mobilisierung und des Transports von Radionukliden, die Abbildung diverser weiterer Prozesse, welche die Ausbreitung der Radionuklide beeinflussen können. Diese weiteren Prozesse sind zu identifizieren und ebenfalls unter Berücksichtigung der jeweiligen thermischen, chemischen, hydraulischen, biologischen und (geo-)mechanischen Bedingungen anzuwenden.

(2) Die Modelle für diese weiteren Prozesse sind direkt in die numerischen Modelle zur Dosisabschätzung zu integrieren oder separat umzusetzen, um Eingangsgrößen zur Verwendung in den Modellen zur Dosisabschätzung herzuleiten. Sämtliche Prozesse, die auf einen möglichen Einfluss auf die

Radionuklidenausbreitung geprüft werden, sind zu benennen und die Entscheidung zur Verwendung oder Vernachlässigung ist zu begründen.

10.3 Qualifizierung von Berechnungsmodellen

(1) Es dürfen nur verifizierte Codes verwendet werden. Die richtige Implementierung des mathematischen Modells in das Berechnungsmodell soll überprüft werden (vgl. IAEA 2019). Die Verifizierung der verwendeten Berechnungsmodelle ist nachzuweisen. Bei kommerziellen Codes ist auf die entsprechenden Berichte zu verweisen, selbst entwickelte Codes müssen vollständig verifiziert werden. Die Verifikation ist zu dokumentieren. Durch das Erfüllen zuvor definierter Tests, beispielsweise auf numerische Konvergenz, ist sicherzustellen, dass die verwendeten Berechnungsmodelle die jeweiligen Problemstellungen mit der notwendigen Genauigkeit berechnen. Dafür sind objektive Kriterien zu definieren, die vom Berechnungsmodell erfüllt werden müssen.

(2) Die Validierung von mathematischen Modellen und Berechnungsmodellen dient dazu, zu prüfen, ob das jeweilige Modell das reale unterliegende System adäquat abbildet (vgl. IAEA 2019). Dies geschieht beispielsweise durch den Vergleich der Modellergebnisse mit Ergebnissen aus experimentellen Labor- oder Feldversuchen. In Fällen ohne geeignete experimentelle Daten aus Labor- oder Feldversuchen und -beobachtungen zur objektiven Validierung sind Vergleiche mit Ergebnissen unterschiedlicher Modelle vorzunehmen. Es ist eine nachvollziehbare argumentative Begründung für die Adäquatheit des Vergleichsmodells vorzulegen und es ist anzugeben und zu begründen, welcher Grad der Übereinstimmung erreicht werden muss, um die Validierung zu erfüllen. Darüber hinaus sind Grenzen der Gültigkeit für die verwendeten mathematischen Modelle anzugeben. Wo dies nicht möglich ist, ist argumentativ zu begründen, warum ein mathematisches Modell trotzdem in diesem Bereich verwendet werden kann. Die Validierung bezieht sich auf die im jeweiligen Berechnungsmodell verwendeten Parameter wie z. B. zeitliche oder räumliche Diskretisierung, Abbruch- und Konvergenzkriterien. Es soll weiterhin gezeigt werden, dass die räumliche und zeitliche Diskretisierung keinen wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat. Außerdem sollte für das jeweilige Berechnungsmodell die prinzipielle Eignung durch ähnliche Referenzprojekte gezeigt werden, in denen sich das Berechnungsmodell durch eine unabhängige Überprüfung erfolgreich bewährt hat.

(3) Im Fall von Aktualisierungen von Software, wie z. B. Programmbibliotheken oder auch des Betriebssystems, und der für Berechnungen relevanten Computer-Hardware, ist zu zeigen und zu dokumentieren, dass die Verifizierung weiterhin gültig sind (vgl. IAEA 1999 Kapitel 1.3.3).

11 Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell

- (1) Die Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell stellt den modelltechnischen Übergang von der Geosphärenmodellierung zur Biosphärenmodellierung dar und ist auf den jeweiligen Untersuchungsraum und das darin vorgesehene Endlagersystem abzustimmen. Es wird darin festgelegt, wie Ein- und Ausgabeparameter der verschiedenen Modelle zusammenhängen, und definiert konsistente Modelle für den Stoffaustausch zwischen den Modellen.
- (2) Die Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell ist auf das übergeordnete Vorgehen und die daraus abgeleiteten und verwendeten Methoden bei der Dosisabschätzung abzustimmen. Dies umfasst die Berücksichtigung aller relevanten Aspekte der jeweils betrachteten Entwicklung, der betrachteten Radionuklide und Zerfallsketten, der Annahmen zur Nutzung von Wasser aus der Biosphäre und aus der Geosphäre sowie der Konzeptualisierung des Radionuklidtransports in den Modellen zur Geosphäre und zur Biosphäre. Auch die Dimensionen der Transportpfade, die jeweiligen Ausbreitungsmedien sowie zugehörige Randbedingungen, Feststoff-, Gas- und Wasserflüsse sowie jeweils die zeitliche und räumliche Diskretisierung im Geo- und im Biosphärenmodell sind so aufeinander abzustimmen, dass Fehler, einschließlich numerische Fehler, bei der Modellierung des Übergangs von Radionukliden aus dem Geosphärenmodell in das Biosphärenmodell so klein wie möglich gehalten werden.
- (3) Die Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell eines Untersuchungsraums darf im Modell durch mehrere unterschiedliche Schnittstellen zusammengesetzt sein, beispielsweise für unterschiedliche Ausbreitungsmedien, Transportpfade oder Austrittsstellen aus der Geosphäre. Die konkrete Lage und die Art jeder Schnittstelle sowie Änderungen der Schnittstellen im Verlauf des Bewertungszeitraums sind darzustellen.
- (4) Die Wahl und räumliche Positionierung der Schnittstellen sind zu begründen. Insbesondere, wenn Radionuklide vom Menschen selbst gefördert werden, was beispielweise bei der Nutzung von Grundwasserbrunnen der Fall ist, ist die räumliche Positionierung unter Berücksichtigung der Radionuklidströme und -konzentrationen im Untergrund zu berücksichtigen und darzustellen (siehe auch Kapitel 4.2 Grundsatz (2)).
- (5) Es ist festzulegen, welche Informationen außer den Radionuklidströmen und den zugehörigen Ungewissheiten an der Schnittstelle Geosphärenmodellierung – Biosphärenmodellierung aus dem Geosphärenmodell übergeben werden. Für die Biosphärenmodellierung relevante Informationen, die zum Beispiel für die Beurteilung der Nutzbarkeit des Grundwassers unter Berücksichtigung des Gehalts nichtradioaktiver Stoffe notwendig sind, können auch anderen Modellen, die im Rahmen der vSu erstellt werden, entnommen werden.
- (6) Generische Annahmen zur Schnittstelle Geosphärenmodell - Biosphärenmodell dürfen nur verwendet werden, wenn sie keine Bevorteilung oder Benachteiligung für einzelne Untersuchungsräume oder Wirtsgesteine bedeuten.
- (7) Da es sich bei der Schnittstelle nur um den modelltechnischen Übergang zwischen Geosphärenmodellierung und Biosphärenmodellierung handelt, ist es zulässig, dass die Schnittstelle nach formalen Definitionen von Bio- und Geosphäre in der Fachliteratur sowohl innerhalb einer der beiden Sphären als auch in beiden Sphären liegt.

12 Biosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung

12.1 Übergeordnete Aspekte der Biosphärenmodellierung

(1) Für die Auswahl der Radionuklide, die in den Rechenfällen betrachtet werden, sind die Vorgaben in Kapitel 9 anzuwenden. Radionuklide dürfen nicht allein aufgrund ihrer physikalischen Halbwertszeit außer Acht gelassen werden, da manche kurzlebigen Radionuklide durch ein langlebiges Mutternuklid nachgebildet werden. Ein allgemeingültiges Abschneidekriterium, das nur die physikalische Halbwertszeit des jeweiligen Radionuklids berücksichtigt, ist daher nicht möglich.

(2) Bei Zerfallsreihen mit einem langlebigen Mutternuklid und kurzlebigen Tochternukliden darf zur Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person in manchen Fällen vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen. Lange Zerfallsreihen dürfen zu Berechnungszwecken so in Teilreihen aufgeteilt werden, dass jede Teilreihe jeweils mit einem langlebigen Mutternuklid beginnt und sonst nur kurzlebige Tochternuklide enthält. Für jede Teilreihe darf dann wieder vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen. Die langlebigen Mutternuklide und deren kurzlebige Tochternuklide dürfen gemäß Anlage 4 Tabelle 2 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV, Deutscher Bundestag 2018) festgelegt werden, falls das langlebige Mutternuklid in dieser Tabelle aufgeführt ist.

(3) Die Modelle und Parameter zur Berechnung der zusätzlichen Exposition sind so festzulegen, dass bei deren Anwendung die zu erwartende zusätzliche Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung nicht unterschätzt wird. Für die in dieser Berechnungsgrundlage angegebenen Modelle dürfen für kühlgemäßigtes Klima (aktuelles Klima in Deutschland) die Parameterwerte aus der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten, BMUV 2020a) in der jeweils gültigen Fassung entnommen werden. Im zu begründenden Einzelfall dürfen die eingesetzten Modelle und Parameter von denen in dieser Berechnungsgrundlage abweichen. Die Annahmen für die Berechnung der zusätzlichen Körperdosen der repräsentativen Person müssen so realistisch wie mit vertretbarem Aufwand möglich sein. Bei der Berechnung der zu erwartenden zusätzlichen Exposition durch die in die Biosphäre gelangten Radionuklide sind bevorzugt spezifische Daten und sonstige Informationen des Untersuchungsraumes anzuwenden, wie beispielsweise die Eigenschaften der lokalen Grundwasserleiter, Flüsse oder Seen. Diese Daten und sonstigen Informationen dürfen dann für den Zeitraum eingesetzt werden, für den deren Gültigkeit plausibel begründet wird. Sind keine Daten für den Untersuchungsraum vorhanden oder ist deren Gültigkeit nicht gesichert, sind plausible Annahmen zu treffen, die detailliert zu begründen sind.

(4) Zur Deckung des Wasserbedarfs für Trinken, Tränken und Bewässern (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) ist die Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser zu berücksichtigen. Die Beregnung ist die typische Form der Bewässerung in der Landwirtschaft unter einem kühlgemäßigten Klima. In anderen Klimaregionen werden allerdings auch andere Formen der Bewässerung praktiziert, wie beispielsweise die wassersparende Tröpfchenbewässerung in ariden Gebieten. Bei der Nutzung des Wassers ist zu prüfen, ob das verfügbare Wasser aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung, insbesondere der Konzentration gelöster Salze, für den jeweiligen Anwendungszweck geeignet ist. Von den beiden Varianten (Nutzung von Grundwasser, Nutzung von Oberflächenwasser) ist für

jeden Verwendungszweck jeweils die ungünstigere für die Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person heranzuziehen. Weiterhin ist zu prüfen, ob oberflächennahes Grundwasser für die Wurzelaufnahme von Nutzpflanzen in ausreichender Menge verfügbar ist und den Wasserbedarf dieser Pflanzen decken kann. Außerdem ist der Gastransport von Radionukliden von der Geosphäre bis in die Atmosphäre zu betrachten. Gasgebundene Transportprozesse in die Atmosphäre führen unter anderem zur Kontamination der Atemluft im Freien und in Gebäuden sowie zur Kontamination von Pflanzen infolge der Photosynthese von $^{14}\text{CO}_2$.

(5) Für die Modellierung muss untersucht werden, ob die lokalen Wasservorkommen (Grundwasser, Oberflächenwasser) in einem Untersuchungsraum den Wasserbedarf decken. Dabei ist von einer kleinen Gruppe von 10 Personen auszugehen, die einen Hof bewirtschaftet. Unter realitätsnahen Annahmen ist der benötigte Wasserbedarf für die potentiellen Klimaentwicklungen in einem Untersuchungsraum zu berechnen. Dieser Wasserbedarf muss durch den oder die gewählten Grundwasserleiter bzw. das gewählte Oberflächengewässer langfristig gedeckt werden können. Die Auswahl der genutzten Grundwasserleiter muss den heutigen Maßstäben entsprechen. Hierzu zählt unter anderem die Ergiebigkeit. Ein Grundwasserleiter mit einer geringen Ergiebigkeit würde nach den heutigen Maßstäben nicht genutzt, wenn nutzbares Oberflächenwasser in ausreichender Menge zur Verfügung steht.

(6) Die Biosphärenmodellierung in der vorliegenden Berechnungsgrundlage bezieht sich ausschließlich auf potentielle Endlagerstandorte im Landesinneren und enthält deshalb Berechnungsverfahren zur Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person für terrestrische und limnische Ökosysteme. Falls im Rahmen der Standortsuche für ein Endlager für radioaktive Abfälle Untersuchungsräume in Küstennähe oder bei Transgression unter dem Meer zu betrachten sind, sind die Modellierungsansätze der vorliegenden Berechnungsgrundlage zu erweitern. Hierbei sind insbesondere folgende Prozesse zu berücksichtigen:

1. Eintrag von Radionukliden aus dem Endlager im Küstenbereich oder unter dem Meer in das Meeresgewässer einschließlich der Ausbreitung der Radionuklide im Meeresgewässer.
2. Anlagerung von Radionukliden an Schwebstoffe im Meerwasser, Sedimentation kontaminierter Schwebstoffe und Remobilisierung von Radionukliden aus dem marinen Sediment.
3. Aufnahme der Radionuklide durch marine Biota, sofern sie für die menschliche Ernährung genutzt werden.
4. Änderung der Küstenlinie innerhalb des Bewertungszeitraums durch Erosion sowie Anstieg und Abfall des Meeresspiegels und deren Einfluss auf die Kontamination und den Salzgehalt terrestrischen Grundwassers sowie auf die Kontamination freifallender Landmassen.

12.2 Klima

12.2.1 Allgemeine Vorgaben

(1) Das Klima prägt die Biosphäre, die Lebensgewohnheiten und Wirtschaftsweisen sowie die Nutzung lokaler Ressourcen. Die zeitliche Entwicklung³ des Klimas in einem Untersuchungsraum ist über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre nicht gesichert prognostizierbar. Die für die Dosisabschätzung notwendigen klimatischen Eingangsdaten sind der für die Ermittlung der zusätzlichen

³ Die Einteilung der klimatischen Entwicklungen in zu erwartend und abweichend entfällt für die Biosphäre, da sich diese Einteilung nur auf das Endlagersystem bezieht und die Biosphäre kein Teil des Endlagersystems ist.

Exposition gewählten Entwicklung zu entnehmen. Falls diese Entwicklung nicht alle notwendigen klimatischen Eingangsdaten bereitstellt oder diese unzulänglich detailliert ausweist, dann sind diese Eingangsdaten mit plausiblen und, falls möglich, auf Messungen basierenden Klimadaten von Referenzorten zu ergänzen. Notwendige Daten sind Monatsmittelwerte der Klimadaten (z. B. Monatsmittelwerte über 30 Jahre) für die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte und den Niederschlag (siehe auch Gleichung (1) in Kapitel 12.2.2).

(2) Bei der Biosphärenmodellierung sind stilisierte klimatische Zustände anzuwenden, welche die Bandbreite der potentiellen klimatischen Entwicklungen in einem Untersuchungsraum, die sich aus der Ableitung von Entwicklungen für diesen Untersuchungsraum ergibt, abdeckend beschreiben. Dies bedeutet, dass zusätzlich zur Berechnung des Radionuklidtransports mit den aktuellen kühlgemäßesten klimatischen Verhältnissen in Deutschland kältere und wärmere klimatische Verhältnisse mit unterschiedlichen Niederschlagsmengen zu berücksichtigen sind, um sämtliche potentiellen Klimaentwicklungen eines Untersuchungsraumes über den Bewertungszeitraum abzubilden. Für die Dauer eines Klimatyps innerhalb des Bewertungszeitraums werden die jeweiligen Klimadaten als konstant angenommen.

(3) Für die Dosisabschätzung sind zusätzlich die Übergangsphasen zwischen den verschiedenen zukünftig möglichen Klimatypen während des Bewertungszeitraums zu berücksichtigen.

(4) Es ist im Bewertungszeitraum für jeden Klimatyp auf die Verträglichkeit der landwirtschaftlich erzeugten Pflanzen (Nahrungs- und Futtermittel) mit den klimatischen Bedingungen zu achten. Ebenso sind die Konsequenzen der Klimaentwicklung für die hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsraum (z. B. Veränderungen im Grundwasserspeicher, Neubildung oder Veränderung der Oberflächengewässer) und die Veränderung der Oberfläche zu berücksichtigen, wie z. B. die Überflutung von Flächen aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs und die Verlandung von Seen.

12.2.2 Abschätzung des Wasserbedarfs für die Landwirtschaft

(1) Es wird von einer Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) nach Bedarf ausgegangen. Daher ist für jeden Klimazustand die monatlich benötigte Wassermenge zum Ausgleich des Wasserdefizits abzuschätzen. Aufgrund der Saisonalität in den Jahressganglinien der klimatischen Parameter sind Monatswerte der Klimadaten (z. B. Monatsmittelwerte über 30 Jahre) zu verwenden. Mit folgender Gleichung kann die für die Bewässerung der Nutzpflanzen benötigte monatliche Wassermenge abgeschätzt werden:

$$B_l = (2 + 0,2 \cdot T_l) \cdot T_l - 1,2 \cdot (F_l - 80) - P_l \quad (1)$$

Hier bedeuten:

- l: Index zur Kennzeichnung des Monats eines Bezugsjahres
- B_l: Im Monat l benötigte Wassermenge für Bewässerungszwecke in mm
- T_l: Mittlere monatliche Lufttemperatur im Monat l in °C
- F_l: Mittlere monatliche relative Luftfeuchte im Monat l in %
- P_l: Mittlerer monatlicher Niederschlag im Monat l in mm

(2) Falls B_l < 0 gemäß Gleichung (1), liegt kein Wasserdefizit vor und es ist B_l = 0 zu setzen. In diesem Fall erfolgt keine Bewässerung. Ebenso erfolgt unterhalb einer mittleren Monatslufttemperatur von 5 °C keine Bewässerung.

(3) Das Wasserdefizit während der Wachstumszeit von Weidebewuchs und pflanzlichen Nahrungsmitteln (Vegetationsperiode) muss über die Bewässerung ausgeglichen werden. Vereinfachend darf während dieses Zeitraums von einer

konstanten Bewässerungsrate landwirtschaftlicher Flächen ausgegangen werden. Hierbei ist der jährliche Wasserbedarf zugrunde zu legen, der sich aus dem mit Gleichung (1) ermittelten monatlichen Wasserbedarf ergibt. Für kühlgemäßes Klima ist eine Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) während sechs Monaten eines Jahres zu unterstellen. Sofern die Pflanzen über oberflächennahes Grundwasser versorgt werden, ist keine zusätzliche Bewässerung anzunehmen.

12.3 Ausbreitung von Radionukliden und Umweltkontamination

12.3.1 Allgemeine Vorgaben

(1) Grundlage für die Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person sind die Einträge von Radionukliden über lösungs- oder gasgebundene Transportprozesse aus der Geosphäre in die Biosphäre. Allgemeine Vorgaben zur Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell sind im Kapitel 11 zu finden. Für die Auswahl der Radionuklide, die in den Rechenfällen betrachtet werden, sind die Vorgaben in Kapitel 9 anzuwenden.

(2) Die modelltechnische Darstellung der hydrologischen und hydrogeologischen Situation im Untersuchungsraum über den Bewertungszeitraum ist in möglichst umfassender Konsistenz mit den Ergebnissen der Ableitung von Entwicklungen zu gestalten. Die Geosphärenmodellierung erfordert unter anderem die Modellierung der regionalen und lokalen hydrogeologischen Situation, bei der alle vorkommenden Grundwasserleiter und Grundwassernichtleiter zu berücksichtigen sind. Die Grundwassermodelle liefern unter anderem Informationen über Wasserdargebot und Exfiltrationszonen, welche die Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell prägen. Die Zusammensetzung des Grundwassers gibt zudem Aufschluss über die Nutzbarkeit kontaminierten Grundwassers aufgrund des Gehaltes nichtradioaktiver gelöster Stoffe (Kapitel 11 Absatz 5). Die für die Biosphärenmodellierung benötigten räumlich aufgelösten Eingangsdaten sind:

1. Fließrate des kontaminierten Grundwassers aus der Geosphäre in die Biosphäre und die Konzentration gelöster Radionuklide im kontaminierten Grundwasser.
2. Eintragsrate gasförmiger Radionuklide aus der Geosphäre in die Biosphäre.
3. Chemische Zusammensetzung des Grundwassers, insbesondere die Konzentration der in den Grundwasserleitern gelösten Salze, welche die Nutzbarkeit des Wassers als Trinkwasser, Tränkwasser oder für die Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) einschränken.

(3) Für die Nutzbarkeit von Grundwasser als Trinkwasser, Tränkwasser oder für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) ist unter anderem die Konzentration gelöster Salze maßgebend. Für den Gesamtgehalt löslicher Salze als Kriterium zur Nutzbarkeit müssen zu diesem Zweck Obergrenzen begründet hergeleitet werden. Grundwasser zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen darf aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung, insbesondere der Konzentration der gelösten Salze, auch bei langanhaltender Bewässerung keine nachteiligen Veränderungen der Böden erwarten lassen.

(4) Aus diesen Eingangsdaten, die jeweils im zeitlichen Verlauf über den Bewertungszeitraum anzusetzen sind, sind die Kontaminationen der Umweltmedien und der Lebensmittel zu berechnen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Aktivitätskonzentration der kontaminierten Lösung nach dem Eintritt in die Biosphäre durch verschiedene Prozesse vor der Wassernutzung verändert wird. Messwerte

und regionale hydrogeologische Modelle können zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Grundwasserzusammensetzung verwendet werden.

(5) Bei der Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person ist zu berücksichtigen,

1. ob nutzbare Grundwasservorkommen in einem Untersuchungsraum vorzufinden sind, und
2. ob sich aus der Ionenstärke bzw. dem Salzgehalt eine eingeschränkte Nutzungsmöglichkeit des geförderten Grundwassers ergibt oder eine Nutzung unmöglich ist.

(6) Die Bandbreite der klimatischen Entwicklung im zu betrachtenden Untersuchungsraum wird durch abdeckende klimatische Zustände und den klimatischen Übergangsphasen berücksichtigt (siehe Kapitel 12.2).

12.3.2 Grundwasser

(1) Für alle Untersuchungsräume, in denen im Bewertungszeitraum Grundwasser im Untergrund vorhanden ist, wird angenommen, dass der lösungsgebundene Radionuklidtransport aus der Geosphäre in die nach heutigen Maßstäben für die Grundwasserförderung geeigneten Grundwasserleiter und in ein siedlungsnahes Oberflächengewässer (See oder Fluss) erfolgt. Es sind der Grundwasserfluss zu berechnen und sowohl Grundwasser als auch Oberflächenwasser als Trinkwasser für die Bevölkerung, zum Tränken des Viehs und zur Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen vorzusehen, wenn die Gegebenheiten im jeweiligen Untersuchungsraum im Bewertungszeitraum dies zulassen. Die für die abgeschätzte zusätzliche Exposition der repräsentativen Person ungünstigere Variante ist maßgebend.

(2) Für die Parameter und Eigenschaften von Grundwasserleitern und Oberflächengewässern sind Daten des Untersuchungsraums einzusetzen. Es ist zu analysieren und zu begründen, für welche Zeiträume die Daten im Untersuchungsraum gültig sind. Für alle übrigen Zeiträume oder falls Daten im Untersuchungsraum fehlen, ist bei Daten, die außerhalb des Untersuchungsraums gewonnen wurden, sinngemäß nach § 5 Absatz 3 EndSiUntV vorzugehen. Falls auch dies nicht möglich ist, sind plausible Annahmen zu treffen und zu begründen.

(3) Zusätzlich ist für jeden Untersuchungsraum im Bewertungszeitraum zu prüfen, ob in Abhängigkeit vom betrachteten klimatischen Zustand signifikante Schwankungen des Grundwasserspiegels, aufsteigendes Grundwasser oder sonstige aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser auftreten können. In diesen Fällen ist eine mögliche Kontamination des Bodens infolge dieser Prozesse im Rahmen der Modellierungen zu bestimmen (siehe Kapitel 12.3.4).

12.3.3 Oberflächengewässer und Sediment

Allgemeine Vorgaben

(1) Bei der Nutzung von Oberflächenwasser als Trinkwasser, zum Tränken des Viehs und zur Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) ist vereinfachend davon auszugehen, dass in allen Fällen ungefiltertes Wasser, d. h. Oberflächenwasser einschließlich der darin enthaltenen Schwebstoffe, verwendet wird. Um eine unangemessen aufwendige Modellierung des Radionuklidtransports in Oberflächengewässern zu vermeiden, wird die Verringerung der Aktivitätskonzentration im Oberflächenwasser durch Sedimentation kontaminierter Schwebstoffe nicht berücksichtigt. Die zusätzliche Exposition der repräsentativen Person infolge der Nutzung kontaminierten Oberflächenwassers wird hierdurch konservativ abgeschätzt.

Ausbreitung von Radionukliden in Fließgewässern

(2) Für die Kontamination von Fließgewässern sind alle Radionuklide zu berücksichtigen, die aus dem Endlager ausgetragen und mit dem Grundwasser oder als Gas in das Fließgewässer transportiert werden. Radionuklide dürfen nur dann außer Acht gelassen werden, wenn schlüssig nachgewiesen wird, dass die nicht betrachteten Radionuklide und deren Tochternuklide nicht dosisrelevant sind (siehe auch Kapitel 12.1).

(3) Vereinfachend wird die Verringerung des Schwebstoffgehalts des Wasserkörpers infolge Sedimentation vernachlässigt. Während des Transports im Fließgewässer, d. h. zwischen dem Eintritt in das Fließgewässer und der Entnahme des Wassers, zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Die Verringerung der Aktivität langlebiger Radionuklide während des Transports im Fließgewässer darf zur Vereinfachung der Berechnung vernachlässigt werden, dem Aufbau kurzlebiger Tochternuklide ist jedoch Rechnung zu tragen. Vereinfachend wird das in Kapitel 12.1 beschriebene Verfahren angewendet, bei dem unterstellt wird, dass in einer Zerfallsreihe bzw. in einer Teilreihe die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen. Unter der Annahme einer homogenen Durchmischung im Fließgewässer kann die Konzentration $C_{k,r}^W$ des Radionuklids r im Fließgewässer (ungefiltertes Wasser) im k -ten Bezugsjahr für den jeweiligen Expositionspfad folgendermaßen berechnet werden:

$$C_{k,r}^W = a_w \cdot \frac{A_{k,r}}{MQ_k} \quad (2)$$

Hier bedeuten:

k :	Index zur Kennzeichnung des Bezugsjahres
$C_{k,r}^W$:	Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im Fließgewässer (ungefiltertes Wasser) im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
$A_{k,r}$:	In das Fließgewässer transportierte Aktivität des Radionuklids r im k -ten Bezugsjahr in Bq
a_w :	Umrechnungsfaktor zur Umrechnung der Zeit- und Volumeneinheiten; $a_w = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$
MQ_k :	Mittlerer Abfluss (Mittelwasser) des Fließgewässers im k -ten Bezugsjahr in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

(4) Bei im Wasser gasförmig gelösten Radionukliden, insbesondere C-14 als $\text{CO}_2(\text{aq})$, ist der Gasaustausch an der Grenzfläche Wasser – Atmosphäre unter Berücksichtigung der Gegebenheiten des Untersuchungsraumes zu betrachten. Hierbei sind insbesondere die zu erwartende Wasserchemie, die lokalen meteorologischen Gegebenheiten und die Eisbildung an der Gewässeroberfläche zu berücksichtigen.

Ausbreitung von Radionukliden in stehenden Gewässern

(5) Für die Kontamination stehender Gewässer sind alle Radionuklide zu berücksichtigen, die aus dem Endlager ausgetragen werden und über Grundwasser, über Fließgewässer oder als Gas in das stehende Gewässer gelangen. Radionuklide dürfen nur dann außer Acht gelassen werden, wenn schlüssig nachgewiesen wird, dass die nicht betrachteten Radionuklide und deren Tochternuklide nicht dosisrelevant sind (siehe auch Kapitel 12.1).

(6) Vereinfachend wird die Verringerung des Schwebstoffgehalts des Wasserkörpers infolge Sedimentation vernachlässigt. Während der Verweilzeit im stehenden Gewässer, d. h. zwischen dem Eintritt in das stehende Gewässer und der Entnahme des Wassers, zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Die Verringerung der Aktivität langlebiger Radionuklide während der Verweilzeit im stehenden Gewässer darf zur Vereinfachung der Berechnung vernachlässigt werden, dem Aufbau kurzlebiger Tochternuklide ist jedoch Rechnung zu tragen. Vereinfachend wird das in Kapitel 12.1 beschriebene Verfahren angewendet, bei dem unterstellt wird, dass in einer Zerfallsreihe bzw. in einer Teilreihe die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen.

(7) Für das stehende Gewässer wird eine vollständige Durchmischung angenommen. Wird das stehende Gewässer primär vom Grundwasser gespeist, dann darf für das stehende Gewässer die gleiche Aktivitätskonzentration wie im Grundwasser angenommen werden. Ansonsten ist die Konzentration $C_{k,r}^W$ des Radionuklids r im stehenden Gewässer (ungefiltertes Wasser) am Ende des k -ten Bezugsjahres für den jeweiligen Expositionspfad nach folgender Gleichung rekursiv zu berechnen:

$$C_{k,r}^W = C_{k-1,r}^W \cdot \exp(-\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}} \cdot t_{1a}) + \frac{1}{\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}}} \cdot \frac{1}{V_{\text{Gew}}} \cdot \left(\sum_j C_{k,r}^j \cdot MQ_k^j + \frac{A_{k,r}}{1000 \cdot t_{1a}} \right) \cdot [1 - \exp(-\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}} \cdot t_{1a})] \quad (3)$$

Hier bedeuten:

- j : Index zur Kennzeichnung des Zuflusses des stehenden Gewässers
- $C_{k,r}^W$: Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im stehenden Gewässer (ungefiltertes Wasser) am Ende des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$. $C_{0,r}^W$ ist die Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im stehenden Gewässer zum Zeitpunkt des vorgesehenen Verschlusses des Endlagers.
- $\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}}$: Effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r im stehenden Gewässer während des k -ten Bezugsjahres in s^{-1}
- $$\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}} = \lambda_r + \frac{1}{V_{\text{Gew}}} \sum_j MQ_k^j$$
- λ_r : Physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r in s^{-1}
- V_{Gew} : Volumen des stehenden Gewässers in m^3
- MQ_k^j : Mittlerer Abfluss (Mittelwasser) des Zuflusses j während des k -ten Bezugsjahres in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $A_{k,r}$: Eintrag des Radionuklids r in das stehende Gewässer durch Grundwasser im k -ten Bezugsjahr in Bq
- $C_{k,r}^j$: Mittlere Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im Zufluss j während des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$
- t_{1a} : Zeitdauer eines Jahres in s

(8) Ist der Zufluss von Grundwasser im Vergleich zur Summe der mittleren Abflüsse der oberirdischen Zuflüsse nicht zu vernachlässigen, ist in Gleichung (3) $A_{k,r} = 0$ zu setzen und der Zufluss kontaminierten Grundwassers rechentechnisch wie ein zusätzlicher oberirdischer Zufluss zu behandeln.

(9) Bei im Wasser gasförmig gelösten Radionukliden, insbesondere C-14 als $\text{CO}_2(\text{aq})$, ist der Gasaustausch an der Grenzfläche Wasser – Atmosphäre unter Berücksichtigung der Gegebenheiten des Untersuchungsraumes zu betrachten. Hierbei sind insbesondere die zu erwartende Wasserchemie, die lokalen meteorologischen Gegebenheiten und die Eisbildung an der Gewässeroberfläche zu berücksichtigen.

Kontamination von Ufersediment

(10) Die Sedimentation kontaminierter Schwebstoffe führt zur Bildung kontaminierten Ufersediments. Im Ufersediment zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Zur Berechnung der Kontamination des Ufersediments darf vereinfachend von einer konstanten Sedimentationsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Für die flächenbezogene Aktivität des Radionuklids r_i im Ufersediment im k -ten Bezugsjahr ergibt sich unter Berücksichtigung der Tochternuklide folgendes System gewöhnlicher Differentialgleichungen:

$$\frac{dO_{k,r_i}(t)}{dt} = \dot{Q}_{U,k,r_i} + \lambda_{r_{i-1}} \cdot a_{r_{i-1},r_i} \cdot O_{k,r_{i-1}}(t) - \lambda_{r_i} \cdot O_{k,r_i}(t) \quad (4)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

r_i :	Index zur Kennzeichnung der Radionuklide innerhalb der Zerfallsreihe: $r_i = 1$ für das Mutternuklid $r_i = 2, 3, 4 \dots$ für das 1., 2., 3. ... Tochternuklid
$O_{k,r_i}(t)$:	Flächenbezogene Aktivität des Radionuklids r_i im Ufersediment im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
a_{r_{i-1},r_i} :	Anteil der Zerfälle des Radionuklids r_{i-1} , die zum Radionuklid r_i führen (dimensionslos)
\dot{Q}_{U,k,r_i} :	Flächenbezogene Eintragsrate des Radionuklids r_i durch Sedimentation im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

(11) Das System gewöhnlicher Differentialgleichungen besteht aus je einer Gleichung für das Mutternuklid und jedes berücksichtigte Tochternuklid.

(12) Die Verlagerung der Radionuklide in tiefere Schichten des Sediments bleibt unberücksichtigt. Kontaminiertes Ufersediment kann sich zum einen aus kontaminierten Schwebstoffen im Wasserkörper bilden, es kann zum anderen aber auch durch Grundwasser kontaminiert worden sein, dass durch das Sediment in den Wasserkörper strömt.

(13) Für die Exposition der repräsentativen Person sind nur die oberen Sedimentschichten maßgebend (siehe Kapitel 12.4.3 und 12.4.4). In Abhängigkeit vom Expositionspfad ist daher Gleichung (4) nur über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum vor dem Ende des k -ten Bezugsjahres zu integrieren. Gleichung (4) darf nicht dahingehend interpretiert werden, dass die Sedimentschicht kontinuierlich anwächst.

(14) Gleichung (4) setzt voraus, dass die Zerfallsreihe nicht verzweigt ist. Verzweigte Zerfallsreihen sind durch eine geeignete Indizierung der Radionuklide zu berücksichtigen. Wegen der Indizierung der Radionuklide und der flächenbezogenen Eintragsraten sind alle Radionuklide in den Schwebstoffen jeweils als Mutternuklid ($r_i = 1$) zu betrachten, unabhängig davon, ob sie als Tochternuklid auch in anderen Zerfallsreihen auftreten.

(15) Die flächenbezogenen Aktivitäten der Radionuklide am Ende des Vorjahres bilden die Anfangswerte für das Folgejahr. Daraus ergeben sich die folgenden Randbedingungen für das k-te Bezugsjahr:

$$O_{1,ri}(0) = 0 \quad \text{für alle } ri \quad (5)$$

$$O_{k,ri}(0) = O_{k-1,ri}(t_{1a}) \quad \text{für alle } ri \text{ und } k > 1 \quad (6)$$

(16) Die flächenbezogene Eintragsrate im k-ten Bezugsjahr durch Sedimentation ist:

$$\dot{Q}_{U,k,ri} = \begin{cases} \rho_{Se} \cdot v_{Se} \cdot \bar{C}_{k,ri}^{Sch} & \text{falls } ri = 1 \\ 0 & \text{falls } ri > 1 \end{cases} \quad (7)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

ρ_{Se} : Dichte des Sediments in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Trockenmasse. Für kühlgemäßes Klima darf $\rho_{Se} = 700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ angesetzt werden.

v_{Se} : Sedimentationsgeschwindigkeit in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Für kühlgemäßes Klima darf $v_{Se} = 2,1\cdot 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ angesetzt werden.

$\bar{C}_{k,ri}^{Sch}$: Mittlere spezifische Aktivität des Radionuklids ri in Schwebstoffen im k-ten Bezugsjahr in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Trockenmasse

(17) Die mittlere spezifische Aktivität des Radionuklids ri in Schwebstoffen in Oberflächengewässern im k-ten Bezugsjahr ist nach der Gleichung (8) (siehe unten) zu berechnen.

(18) Die flächenbezogene Aktivität im Ufersediment ist nach Gleichung (4) iterativ für jedes Kalenderjahr zu berechnen. Hierbei sind die Randbedingungen gemäß den Gleichungen (5) und (6) sowie die flächenbezogene Eintragsrate $\dot{Q}_{U,k,ri}$ nach Gleichung (7) zu berücksichtigen.

(19) Das Gleichgewicht im Wasser-Schwebstoff-System stellt sich nicht sofort ein. Während der Anlagerung an Schwebstoffe zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Die Verringerung der Aktivität langlebiger Radionuklide während der Anlagerung darf zur Vereinfachung der Berechnung vernachlässigt werden, dem Aufbau kurzlebiger Tochternuklide ist jedoch Rechnung zu tragen. Vereinfachend wird das in Kapitel 12.1 beschriebene Verfahren angewendet, bei dem unterstellt wird, dass in einer Zerfallsreihe bzw. in einer Teilreihe die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen. Die zeitabhängige Anlagerung der Radionuklide an Schwebstoffe wird mit der elementspezifischen Anlagerungskonstante $\lambda_{Anl,r}$ beschrieben. Für die spezifische Aktivität in Schwebstoffen C_r^{Sch} gilt:

$$C_{k,r}^{Sch} = \begin{cases} K_{Se,r} \cdot [1 - \exp(-\lambda_{Anl,r} \cdot t_f)] \cdot C_{k,r}^W & \text{falls } T_{Anl,r} > 0 \\ K_{Se,r} \cdot C_{k,r}^W & \text{falls } T_{Anl,r} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

$C_{k,r}^{Sch}$: Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Schwebstoffen im k-ten Bezugsjahr in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Trockenmasse

$K_{Se,r}$: Konzentrationsfaktor für Schwebstoffe für das Radionuklid r in $\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}$, siehe Anhang A3 Tabelle 7

$\lambda_{Anl,r}$: Anlagerungskonstante des Radionuklids r an Schwebstoffe in s^{-1} , siehe Anhang A3 Tabelle 7

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

$T_{Anl,r}$:	Halbwertszeit für die Anlagerung des Radionuklids r an Schwebstoffe in Oberflächengewässern in s , siehe Anhang A3 Tabelle 7
t_f :	Zeit zwischen dem Eintritt des Radionuklids r in das Oberflächengewässer und der Entnahme des Wassers zur Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) sowie zur Nutzung als Trinkwasser und Tränkwasser in s

(20) Die Kontamination der Schwebstoffe wird durch die Kontaktzeit der Radionuklide mit den Schwebstoffen, d. h. der Zeit zwischen dem Eintritt in das Oberflächengewässer und der Entnahme des Wassers, bestimmt. Um die Kontamination der Schwebstoffe nicht zu unterschätzen, ist bei Oberflächengewässern (Fließgewässer und stehende Oberflächengewässer) $t_f = 5 \text{ d}$ zu setzen.

(21) Mit Gleichung (4) sind für die langfristige Betrachtung auch sich periodisch wiederholende Ablagerungen, wie z. B. durch jährliche Überschwemmungen, mit abgedeckt.

12.3.4 Kontamination von Böden und Pflanzen

Allgemeine Vorgaben

(1) Die oberen Bodenschichten können durch eine Vielzahl von Prozessen kontaminiert werden. Hierzu zählen die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit kontaminiertem Wasser, kontaminiertes Grundwasser, das die oberen Bodenschichten erreicht, und die Ablagerung von Sediment in Oberflächengewässern, die in der Folge trockenfallen oder verlanden.

Kontamination von Boden und Pflanzen infolge Bewässerung

(2) Die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit kontaminiertem Wasser (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) führt während der Vegetationsperiode zu einem Radionuklideintrag in den Boden. Im Boden zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Der Transport der Radionuklide aus dem Wurzelbereich (Pflugschartiefe 20 cm bei Ackerboden, 10 cm bei Weideboden) in tiefere Bodenschichten wird durch eine elementspezifische Verweilkonstante berücksichtigt. Diese Verweilkonstante umfasst sämtliche Transportprozesse eines Radionuklids in tiefere Bodenschichten und ist daher nicht nur während der Vegetationsperiode, sondern während des gesamten Jahres anzusetzen. Für die flächenbezogene Aktivität des Radionuklids r_i im Wurzelbereich im k -ten Bezugsjahr ergibt sich unter Berücksichtigung der Tochternuklide folgendes System gewöhnlicher Differentialgleichungen:

$$\frac{dB_{k,ri}(t)}{dt} = \dot{Q}_{W,k,ri} + \lambda_{ri-1} \cdot a_{ri-1,ri} \cdot B_{k,ri-1}(t) - (\lambda_{ri} + \lambda_{m,ri}) \cdot B_{k,ri}(t) \quad (9)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$B_{k,ri}(t)$:	Flächenbezogene Bodenkontamination im Wurzelbereich durch das Radionuklid r_i im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
$\dot{Q}_{W,k,ri}$:	Flächenbezogene Eintragsrate des Radionuklids r_i durch Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$\lambda_{m,ri}$:	Verweilkonstante des Radionuklids r_i im Wurzelbereich der Pflanzen aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten in s^{-1} . Für kühlgemäßigtes Klima dürfen Werte gemäß Tabelle 2 angesetzt werden. In Tabelle 2 nicht aufgeführte Elemente sind

aufgrund ihrer chemischen Verwandtschaft zu angegebenen Elementen oder aufgrund von Literaturwerten in die entsprechende Gruppe einzuordnen. Ansonsten sind sie der Gruppe der Aktiniden zuzuordnen.

Tabelle 2: Werte der Verweilkonstante $\lambda_{m,ri}$ für kühlgemäßigtes Klima

Element(e)	$\lambda_{m,ri}$ Acker	$\lambda_{m,ri}$ Weide
für Tc, Cl	10^{-8} s^{-1}	$2,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$
für Sr, Ru, I	10^{-9} s^{-1}	$2,0 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$
für Cs, Aktiniden	10^{-10} s^{-1}	$2,0 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$

(3) Das System gewöhnlicher Differentialgleichungen besteht aus je einer Gleichung für das Mutternuklid und jedes berücksichtigte Tochternuklid.

(4) Gleichung (9) setzt voraus, dass die Zerfallsreihe nicht verzweigt ist. Verzweigte Zerfallsreihen sind durch eine geeignete Indizierung der Radionuklide zu berücksichtigen. Wegen der Indizierung der Radionuklide und der flächenbezogenen Eintragsraten sind alle Radionuklide im Bewässerungswasser jeweils als Mutternuklid ($r_i = 1$) zu betrachten, unabhängig davon, ob sie als Tochternuklid auch in anderen Zerfallsreihen auftreten.

(5) Die flächenbezogenen Aktivitäten der Radionuklide am Ende des Vorjahres bilden die Anfangswerte für das Folgejahr. Daraus ergeben sich die folgenden Randbedingungen für das k -te Bezugsjahr:

$$B_{1,ri}(0) = 0 \quad \text{für alle } r_i \quad (10)$$

$$B_{k,ri}(0) = B_{k-1,ri}(t_{1a}) \quad \text{für alle } r_i \text{ und } k > 1 \quad (11)$$

(6) Die flächenbezogene Eintragsrate während der Vegetationsperiode im k -ten Bezugsjahr durch Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) ist:

$$\dot{Q}_{W,k,ri} = \begin{cases} W_k \cdot \bar{C}_{k,ri}^W & \text{falls } r_i = 1 \\ 0 & \text{falls } r_i > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

W_k : Vom Klima abhängige Bewässerungsrate (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) während der Wachstumszeit von Weidebewuchs und pflanzlichen Nahrungsmitteln (Vegetationsperiode) im k -ten Bezugsjahr in $\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. W_k ergibt sich aus der Summe der für Bewässerungszwecke benötigten monatlichen Wassermenge (siehe Gleichung (1) in Kapitel 12.2.2).

$\bar{C}_{k,ri}^W$: Mittlere Aktivitätskonzentration des Radionuklids r_i im Bewässerungswasser während des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$

(7) Vereinfachend darf im k -ten Bezugsjahr von einer konstanten Bewässerungsrate während der Vegetationsperiode ausgegangen werden. Die mittlere Aktivitätskonzentration des Radionuklids r_i des Bewässerungswassers während des k -ten Bezugsjahres ist für Oberflächengewässer nach den Gleichungen (2) oder (3) in Kapitel 12.3.3 zu berechnen. Wird Grundwasser für die Bewässerung verwendet, so ist die mittlere Aktivitätskonzentration des geförderten Grundwassers anzusetzen.

(8) Die flächenbezogene Aktivität im Wurzelbereich des Bodens bzw. im gesamten Boden ist nach Gleichung (9) iterativ für jedes Kalenderjahr zu berechnen.

Hierbei sind die Randbedingungen gemäß den Gleichungen (10) und (11) sowie die flächenbezogene Eintragsrate $\dot{Q}_{W,k,ri}$ nach Gleichung (12) zu berücksichtigen.

(9) Die spezifische Aktivität $C_{k,ri}^m$ des Radionuklids ri im Wurzelbereich am Ende des k -ten Bezugsjahres ist:

$$C_{k,ri}^m(t_{1a}) = \frac{B_{k,ri}(t_{1a})}{p^m} \quad (13)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$C_{k,ri}^m(t_{1a})$: Spezifische Aktivität des Radionuklids ri im Wurzelbereich am Ende des k -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot kg^{-1}$ Trockenmasse; $m = A$ für Ackerboden, $m = Wd$ für Weideboden

p^m : Flächentrockenmasse des Bodens in $kg \cdot m^{-2}$; $m = A$ für Ackerboden, $m = Wd$ für Weideboden. Für kühlgemäßigtes Klima darf $p^A = 280 kg \cdot m^{-2}$ und $p^{Wd} = 120 kg \cdot m^{-2}$ angesetzt werden.

(10) In Anlehnung an die AVV Tätigkeiten sind zur Abschätzung der zusätzlichen Exposition durch Ingestion pflanzlicher Nahrungsmittel die beiden Lebensmittelgruppen Blattgemüse und pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse zu betrachten, d. h. alle pflanzlichen Nahrungsmittel außer Blattgemüse sind zu einer Lebensmittelgruppe zusammenzufassen.

(11) Bei der Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen durch Beregnung werden nicht nur der Boden, sondern auch oberirdische Pflanzenteile kontaminiert. Die Verringerung der Aktivität oberirdischer Pflanzenteile nach der Beregnung mit kontaminiertem Wasser durch Abwitterung wird durch eine Verweilkonstante (ökologische Halbwertszeit 14 Tage) berücksichtigt. Während der Abwitterung zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Der radioaktive Zerfall langlebiger Radionuklide während der Abwitterung darf wegen der kurzen ökologischen Halbwertszeit zur Vereinfachung der Berechnung vernachlässigt werden, dem Aufbau kurzlebiger Tochternuklide ist jedoch Rechnung zu tragen. Vereinfachend wird das in Kapitel 12.1 beschriebene Verfahren angewendet, bei dem unterstellt wird, dass in einer Zerfallsreihe bzw. in einer Teilreihe die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen.

(12) Durch die Beregnung ergibt sich für alle Radionuklide außer C-14 die spezifische Aktivität in und auf der Pflanze am Ende des k -ten Bezugsjahres aus den Beiträgen der direkt auf der Pflanze abgelagerten Aktivität und der über die Wurzel aufgenommenen Aktivität:

$$C_{k,r}^n = W_k \cdot \bar{C}_{k,r}^W \cdot f_W \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_V \cdot t_W^n)}{\gamma^n \cdot \lambda_V} + C_{k,r}^m \cdot T_r^n \quad (14)$$

mit $C_{k,r}^m$ gemäß Gleichung (13).

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$C_{k,r}^n$: Spezifische Aktivität des Radionuklids r in und auf Pflanzen der Gruppe n am Ende des k -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot kg^{-1}$ Feuchtmasse

$n = Bl$: Blattgemüse

$n = Pf$: pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse

$n = Wd$: Weidepflanzen

f_W : Anteil der durch Beregnung auf der Pflanze abgelagerten Aktivität. Für kühlgemäßigtes Klima darf $f_W = 0,3$ angesetzt werden. Bei anderen Formen der Bewässerung außer Beregnung werden

oberirdische Pflanzenteile nicht kontaminiert und es ist $f_W = 0$ anzusetzen.

λ_V : Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze in s^{-1} . Für kühlgemäßes Klima darf $\lambda_V = 5,7 \cdot 10^{-7} s^{-1}$ angesetzt werden.

$$\lambda_V = \frac{\ln 2}{T_V}$$

T_V : Halbwertszeit für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze in s. Für kühlgemäßes Klima darf $T_V = 1,2 \cdot 10^6$ s (14 Tage) angesetzt werden.

t_W^n : Vom Klima abhängige Zeitdauer, während der Pflanzen der Gruppe n während der Wachstumsperiode infolge Beregnung oberirdisch kontaminiert werden, in s. Für kühlgemäßes Klima darf $t_W^n = 2,6 \cdot 10^6$ s (30 Tage) für $n = \text{Wd}$ und $t_W^n = 5,2 \cdot 10^6$ s (60 Tage) für $n = \text{Pf, Bl}$ angesetzt werden.

Y^n : Ertrag bzw. Bewuchsdichte von Pflanzen der Gruppe n in $kg \cdot m^{-2}$ Feuchtmasse. Für kühlgemäßes Klima dürfen folgende Werte angesetzt werden:

$n = \text{Bl}$: Ertrag von Blattgemüse; $Y^{\text{Bl}} = 1,6 kg \cdot m^{-2}$

$n = \text{Pf}$: Ertrag von pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse; $Y^{\text{Pf}} = 2,4 kg \cdot m^{-2}$

$n = \text{Wd}$: Bewuchsdichte von Weidepflanzen; $Y^{\text{Wd}} = 0,85 kg \cdot m^{-2}$

T_r^n : Transferfaktor vom Boden zur Pflanze der Gruppe n für das Radionuklid r in $Bq \cdot kg^{-1}$ Feuchtmasse pro $Bq \cdot kg^{-1}$ Trockenboden, jeweils für pflanzliche Nahrungsmittel ($n = \text{Pf, Bl}$) oder für Weidepflanzen ($n = \text{Wd}$), siehe Anhang A3 Tabelle 5

(13) Die Gleichungen (13) und (14) sind für die Berechnung der spezifischen Aktivitäten im Wurzelbereich sowie auf und in der Pflanze heranzuziehen.

(14) Anstelle von Gleichung (14) ist die spezifische Aktivität von C-14 in pflanzlichen Nahrungsmitteln ($n = \text{Pf, Bl}$) und in Weidepflanzen ($n = \text{Wd}$) wie folgt zu berechnen:

$$C_{k,C-14}^n = \frac{W_k \cdot \bar{C}_{k,C-14}^W \cdot f_C^n}{V_C} \quad (15)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$C_{k,C-14}^n$: Spezifische Aktivität von C-14 in Pflanzen der Gruppe n am Ende des k-ten Bezugsjahres in $Bq \cdot kg^{-1}$ Feuchtmasse

$\bar{C}_{k,C-14}^W$: Mittlere Aktivitätskonzentration von gasförmig im Bewässerungswasser gelöstem C-14 im k-ten Bezugsjahr in $Bq \cdot l^{-1}$. Die Aktivitätskonzentration von gasförmig gelöstem C-14 in Oberflächengewässern wird mithilfe der Gleichungen (2) und (3) in Kapitel 12.3.3 berechnet. Zusätzlich ist der gasförmige Eintrag von C-14 in die Oberflächengewässer zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel „Ausbreitung von Radionukliden in Fließgewässern“ und „Ausbreitung von Radionukliden in stehenden Gewässern“).

f_C^n : Massenanteil des Kohlenstoffs in Pflanzen der Gruppe n (dimensionslos). Für kühlgemäßes Klima beträgt der Wert 0,09 für

Weidepflanzen ($n = Wd$) und 0,18 für pflanzliche Nahrungsmittel ($n = Bl, Pf$).

V_C : Assimilationsrate für Kohlenstoff in $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Für kühlgemäßes Klima darf $V_C = 10^{-7} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ angesetzt werden.

Kontamination von Boden und Pflanzen durch Grundwassertransport in die oberen Bodenschichten

(15) Bei signifikanten Schwankungen des Grundwasserspiegels, aufsteigendem Grundwasser und sonstigen aufwärtsgerichteten Transportprozessen von Grundwasser ist die mögliche Kontamination des Bodens zu berücksichtigen. Aufsteigendes Grundwasser kann beispielsweise dann auftreten, wenn einem oberflächennahen Grundwasserleiter klimatisch bedingt erhöhte Niederschläge zugeführt werden oder wenn in einem Untersuchungsraum in Tallage ein Grundwasseranstieg durch Grundwasserzufluss aus dem Einzugsgebiet erfolgt. Zusätzlich ist der kapillare Aufstieg kontaminierten Grundwassers aus gesättigten Bodenschichten in oberflächennahe Bodenschichten zu betrachten. Die Kontamination der oberflächennahen Bodenschichten (Pflugschartiefe 20 cm bei Ackerboden, 10 cm bei Weideboden) ist unter Berücksichtigung der Gegebenheiten im jeweiligen Untersuchungsraum mit einem hydrologischen Modell nach Stand von Wissenschaft und Technik zu ermitteln.

(16) Wenn der Wurzelbereich landwirtschaftlich genutzter Böden durch Grundwasserspiegelschwankungen, Grundwasseraufstieg oder sonstige aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser kontaminiert ist, führt dies zur Kontamination von pflanzlichen Nahrungsmitteln und Weidebewuchs durch die Wurzel Aufnahme von Radionukliden:

$$C_{k,r}^n = C_{k,r}^m \cdot T_r^n \quad (16)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bezeichnet $C_{k,r}^m$ die spezifische Aktivität des Radionuklids r im Wurzelbereich am Ende des k -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot kg^{-1}$ Trockenmasse ($m = A$ für Ackerboden, $m = Wd$ für Weideboden).

Kontamination von Boden und Pflanzen durch Sediment in trockenengefallenen oder verlandeten Oberflächengewässern

(17) Wenn Oberflächengewässer trockenfallen oder verlanden oder wenn Fließgewässer langfristig ihren Verlauf ändern, kann kontaminiertes Sediment die oberen Bodenschichten bilden. Solche Flächen sind dann zu berücksichtigen, wenn die Größe der Flächen für die lokal erzeugten Nahrungsmittel ausreicht und die landwirtschaftliche Nutzung dieser Flächen nach heutigen Maßstäben zu erwarten ist. Hierzu zählen z. B. größere Oberflächengewässer, die durch die Absenkung des Grundwasserspiegels trockenfallen, nicht aber stehende Gewässer, die infolge ihrer Verlandung Moore ausbilden.

(18) Die Kontamination der oberen Bodenschichten (Pflugschartiefe 20 cm bei Ackerboden, 10 cm bei Weideboden) am Ende der Sedimentbildung ergibt sich aus der Sedimentation dieser Schichtdicke unmittelbar vor dem Ende der Sedimentbildung in dem Oberflächengewässer (siehe auch Kapitel „Kontamination von Ufersediment“). Sofern die oberen Bodenschichten vom Grundwasser unbeeinflusst sind, ist die Änderung der spezifischen Aktivität durch radioaktiven Zerfall, die Bildung von Folgenukliden und die Verlagerung in tiefere Bodenschichten zwischen dem Ende der Sedimentbildung und dem k -ten Bezugsjahr gemäß den Gleichungen (9), (10), (11) und (13) mit $\dot{Q}_{W,k,ri} = 0$ zu ermitteln. In Anlehnung an den Wert für die Trockendichte von Spülfeldern in der AVV Tätigkeiten ($1200 kg \cdot m^{-3}$) darf für kühlgemäßes Klima $p^A = 240 kg \cdot m^{-2}$ für Ackerboden und $p^{Wd} = 120 kg \cdot m^{-2}$ für Weideflächen angesetzt werden. Sofern die oberen Bodenschichten

vom Grundwasser beeinflusst werden, ist die Änderung der spezifischen Aktivität durch radioaktiven Zerfall, die Bildung von Folgenukliden und die Verlagerung in tiefere Bodenschichten zwischen dem Ende der Sedimentbildung und dem k-ten Bezugsjahr mit einem radioökologischen Modell zu berechnen, das die Gegebenheiten in dem jeweiligen Untersuchungsgebiet berücksichtigt.

(19) Wenn der Wurzelbereich landwirtschaftlich genutzter Böden durch die frühere Ablagerung von Sediment kontaminiert ist, führt dies zur Kontamination von pflanzlichen Nahrungsmitteln und Weidebewuchs durch die Wurzel Aufnahme von Radionukliden. Die spezifische Aktivität in pflanzlichen Nahrungsmitteln und Weidebewuchs ist nach Gleichung (16) zu berechnen.

12.3.5 Kontamination der bodennahen Luft

Gastransport

(1) Radionuklide können auch gasförmig in die Biosphäre gelangen. Beim Gastransport von C-14 und sonstigen gasförmig gebundenen Radionukliden aus der Geosphäre in die Atmosphäre darf die Rückhaltung durch den Boden zur Vereinfachung der Berechnung vernachlässigt werden, sofern nachvollziehbar begründet wird, dass die Radionuklide und gegebenenfalls deren Tochternuklide im Boden nur unerheblich akkumulieren. Zur Abschätzung der Aktivitätskonzentration in der bodennahen Luft ist eine charakteristische stabile atmosphärische Schichtung⁴ mit den entsprechenden meteorologischen Parametern derart zugrunde zu legen, dass die zusätzliche Exposition der repräsentativen Person durch Inhalation nicht unterschätzt wird.

(2) Die Aufnahme von gasförmigem C-14 in die Pflanzen erfolgt durch Photosynthese. Es ist davon auszugehen, dass die Kohlenstoff-Isotope (C-14 und stabile Kohlenstoff-Isotope) in dem gleichen Verhältnis in die Pflanzen eingebaut werden, wie sie in der Luft in Form von CO₂ am betrachteten Ort vorliegen. Die spezifische Aktivität in den Pflanzen ist zu berechnen nach:

$$C_{k,C-14}^n = \bar{C}_{k,C-14}^S \cdot \frac{f_C^n}{C_C^L} \quad (17)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$\bar{C}_{k,C-14}^S$: Mittlere Aktivitätskonzentration von C-14 in Form von CO₂ in der bodennahen Luft während der Wachstumsphase der Pflanzen im k-ten Bezugsjahr in Bq·m⁻³

C_C^L : Kohlenstoffkonzentration der Luft in kg·m⁻³. Der Wert beträgt aktuell 2,0·10⁻⁴ kg m⁻³.

Resuspension kontaminierten Bodens

(3) Kontaminierter Boden kann durch Witterungseinflüsse oder mechanische Einflüsse, wie z. B. der Bodenbearbeitung, aufgewirbelt werden. Die zeitlich gemittelte Staubkonzentration in der bodennahen Luft hängt unter anderem vom Klima, von der Vegetation und der Bebauung sowie von der Bodenbearbeitung ab. Vereinfachend sind für die Staubkonzentration in der bodennahen Luft vom Klima abhängige Referenzwerte zugrunde zu legen, die Berechnung mithilfe von Resuspensionsfaktoren darf entfallen. Der Referenzwert für die Staubkonzentration der

⁴ Die atmosphärische Schichtung ist stabil, wenn die Ausbreitungsklassen I (sehr stabil), II (stabil) oder III/1 (indifferent/stabil) vorliegen oder die Obukhov-Länge positiv ist.

bodennahen Luft für kühlgemäßes Klima beträgt $5 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ bezogen auf die Trockenmasse.

(4) Die Ablagerung kontaminierten Staubes führt zur Kontamination oberirdischer Pflanzenteile. Bei der lebensmitteltechnologischen Verarbeitung und der haushaltsmäßigen Zubereitung werden pflanzliche Nahrungsmittel gewaschen und anhaftender Staub entfernt. Die Kontamination pflanzlicher Lebensmittel durch die Ablagerung kontaminierten Staubes ist deshalb bei der Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person durch Ingestion nicht zu berücksichtigen.

12.4 Zusätzliche Exposition der repräsentativen Person

12.4.1 Allgemeine Vorgaben

(1) Grundlage für die Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person sind die in Kapitel 12.3 berechneten Kontaminationen der Umweltmedien sowie plausible Annahmen zu den Wirtschaftsweisen und Lebensgewohnheiten, insbesondere zu den Ernährungsgewohnheiten. Unter die Wirtschaftsweisen fallen die landwirtschaftlichen Praktiken zur Erzeugung pflanzlicher und tierischer Lebensmittel. Unter Lebensgewohnheiten fallen die Aufenthaltsorte und Aufenthaltszeiten, die Verzehrswerten und die Atemraten der repräsentativen Person.

(2) Für die repräsentative Person ist die über die Lebenszeit (bis einschließlich des 70. Lebensjahres) gemittelte zusätzliche effektive Dosis (gemittelte zusätzliche Jahresdosis) während des Bewertungszeitraums abzuschätzen. Hierzu ist zunächst die zusätzliche Lebenszeitdosis der repräsentativen Person zu berechnen, indem die Dosisbeiträge aller Radionuklide und aller Lebensjahre bis einschließlich des 70. Lebensjahres summiert werden und dann die zusätzliche Lebenszeitdosis durch die Anzahl der Lebensjahre (70) geteilt wird:

$$\bar{E}_{\text{Jahr}} = \frac{1}{70} \cdot \sum_{j=1}^{70} \sum_r (E_{a,r,j} + E_{i,r,j}) \quad (18)$$

Hier bedeuten:

\bar{E}_{Jahr} :	Über die Lebenszeit gemittelte zusätzliche effektive Dosis im Kalenderjahr (gemittelte zusätzliche Jahresdosis) in Sv
j:	Index zur Kennzeichnung des Lebensjahres ($j = 1 \dots 70$)
r:	Index zur Kennzeichnung des Radionuklids
$E_{a,r,j}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) im Lebensjahr j durch äußere Exposition durch das Radionuklid r in Sv
$E_{i,r,j}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) im Lebensjahr j durch innere Exposition durch das Radionuklid r in Sv

Zur besseren Lesbarkeit wird in den Kapiteln 12.4.3 und 12.4.4 auf den Index j zur Kennzeichnung des Lebensjahres verzichtet.

(3) Die zusätzliche Jahresdosis ist für jedes Lebensjahr als Summe der zusätzlichen Dosen durch äußere und innere Exposition aufgrund der ionisierenden Strahlung der in die Biosphäre migrierten Radionuklide zu berechnen. Bei äußerer Exposition ist die zusätzliche effektive Dosis der repräsentativen Person für das Bezugsjahr, bei innerer Exposition die zusätzliche effektive Folgedosis über 50 Jahre bei Erwachsenen und bis einschließlich des 70. Lebensjahres bei allen anderen Altersgruppen der Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV aufgrund der Inkorporation im Bezugsjahr zu berechnen. Es sind die Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten gemäß Anlage 18 Teil B Nummer 4 StrlSchV zu verwenden. Für den

Muttermilchpfad sind zusätzlich die Dosiskoeffizienten aus der AVV Tätigkeiten in der jeweils gültigen Fassung zu verwenden (siehe auch Anhang A2.2). Bei Expositionspfaden, die nach dem Transport von Radionukliden in die Biosphäre mit einer Anreicherung in der Umwelt verbunden sind, ist bei der Berechnung die Akkumulation während des Bewertungszeitraums zu berücksichtigen (siehe Kapitel 12.3).

(4) Die zusätzliche Exposition ist für die repräsentative Person in den Altersgruppen der Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV an den ungünstigsten Einwirkungsstellen zu berechnen. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen, an denen aufgrund der Verteilung der aus dem Endlager ausgetragenen Radionuklide in der Umwelt durch Aufenthalt oder durch den Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchsten zusätzlichen Expositionen der repräsentativen Person zu erwarten sind.

(5) Bei den Lebensgewohnheiten (Aufenthaltszeiten, Aufenthaltsorte, Verzehrswerten, Atemraten) sind für kühlgemäßes Klima die Daten in Anlage 11 Teil B StrlSchV heranzuziehen. Werden die Lebensgewohnheiten an andere Klimata als kühlgemäßes Klima angepasst, sind diese Anpassungen plausibel und nachvollziehbar zu begründen.

(6) Für den Aufenthalt der repräsentativen Person sind die Stellen zugrunde zu legen, an denen sich für die Summe aus zusätzlicher äußerer Exposition und zusätzlicher Inhalation die höchste über die Lebenszeit gemittelte zusätzliche Jahresdosis ergibt und die für den Daueraufenthalt geeignet sind. Für die Aufenthaltszeiten und -orte der repräsentativen Person im Freien und in Gebäuden sind für kühlgemäßes Klima die Annahmen aus Anhang A4 Tabelle 11 heranzuziehen. Werden die Aufenthaltszeiten und -orte an andere Klimata als kühlgemäßes Klima angepasst, sind diese Anpassungen plausibel und nachvollziehbar zu begründen.

(7) Die Verzehrswerten in Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV wurden aus statistischen Daten zum Ernährungsverhalten in Deutschland abgeleitet und sind für kühlgemäßes Klima heranzuziehen. Für die Lebensmittelgruppe, die bei mittleren jährlichen Verzehrsmengen (Spalten 2 bis 7 der Tabelle 1 in Anlage 11 Teil B StrlSchV) zur höchsten zusätzlichen Ingestionsdosis führt, ist zur Berücksichtigung des 95. Perzentils die mittlere jährliche Verzehrsmenge mit dem Faktor in Spalte 8 zu multiplizieren. Zur Festlegung der dosisdominierenden Lebensmittelgruppe sind alle pflanzlichen Nahrungsmittel außer Blattgemüse zu einer Lebensmittelgruppe zusammenzufassen. Für alle übrigen, nicht dosisdominierenden Lebensmittelgruppen sind die mittleren jährlichen Verzehrsmengen anzusetzen. In gleicher Weise ist zu verfahren, wenn die jährlichen Verzehrsmengen an andere Klimata als kühlgemäßes Klima angepasst werden. Für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe ist das 95. Perzentil der jährlichen Verzehrsmenge, für alle übrigen Lebensmittelgruppen sind die mittleren jährlichen Verzehrsmengen anzusetzen.

(8) In Anlehnung an die AVV Tätigkeiten wird unterstellt, dass der Anteil der lokal erzeugten Lebensmittel mit Ausnahme von Muttermilch und Trinkwasser 50 % der verzehrten Menge der repräsentativen Person beträgt. Für Muttermilch und Trinkwasser beträgt der Anteil 100 %.

(9) Als Trink- und Tränkwasser und für die Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) wird ausschließlich das Grundwasser des kontaminierten Grundwasserleiters oder das Oberflächenwasser des lokalen Sees oder Flusses verwendet. Dabei muss unter Darlegung hydrogeologischer und hydrogeochemischer Betrachtungen berücksichtigt werden, wie das Grundwasser im Grundwasserleiter chemisch zusammengesetzt ist und ob diese Zusammensetzung des Grundwassers den jeweiligen Nutzungszweck (Trinkwasser, Tränkwasser, Bewässerung) überhaupt zulässt (siehe Kapitel 12.3).

(10) Für die Erzeugung jeder Lebensmittelgruppe ist jeweils die Stelle auszuwählen, für die sich unter Berücksichtigung der Ernährungsgewohnheiten gemäß Anhang A4 Tabelle 9 bzw. Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV die höchste zusätzliche effektive Folgedosis durch den Verzehr dieser Lebensmittelgruppe ergibt. In gleicher Weise ist zu verfahren, wenn die Ernährungsgewohnheiten an andere Klimata als kühlgemäßigtes Klima angepasst werden.

(11) Für die Abschätzung der zusätzlichen Exposition sind die Nutzungsmöglichkeiten beim Anbau landwirtschaftlicher Produkte in Abhängigkeit von der jeweiligen Entwicklung zugrunde zu legen.

(12) Bei der Erzeugung von Lebensmitteln ist von den aktuell üblichen Wirtschaftsweisen und der guten landwirtschaftlichen Praxis in Industrienationen auszugehen. Es ist eine schonende Bodenbearbeitung und eine auf die langfristige Bodennutzung ausgerichtete Landwirtschaft (keine Auslaugung der Böden) zu unterstellen. Es dürfen keine unmöglichen Varianten berücksichtigt werden, wie z. B. Ackerbau während Klimaperioden mit dauerhaft gefrorenen Böden.

12.4.2 Expositionspfade

(1) Durch den Transport von Radionukliden in die Biosphäre werden Umweltmedien und Lebensmittel kontaminiert. Radionuklide außerhalb des menschlichen Körpers, z. B. im Boden, führen zur zusätzlichen äußeren Exposition der repräsentativen Person. Radionuklide, die mit der Atemluft oder mit Lebensmitteln in den menschlichen Körper gelangen, führen zur zusätzlichen inneren Exposition der repräsentativen Person. Zur Abschätzung der zusätzlichen Exposition der repräsentativen Person sind mindestens folgende Expositionspfade zu berücksichtigen:

Zur Abschätzung der zusätzlichen äußeren Exposition:

1. Zusätzliche Exposition durch Gammastrahlung von Radionukliden im Boden (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Böden)
2. Zusätzliche Exposition durch Gammastrahlung von Radionukliden im Ufersediment von Oberflächengewässern (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment)

Zur Abschätzung der zusätzlichen inneren Exposition bei Radionukliden in Gasform und sonstigen luftgetragenen Radionukliden:

3. Zusätzliche Exposition durch Aufnahme von Radionukliden mit der Atemluft (Inhalation)
4. Zusätzliche Exposition durch Aufnahme von Radionukliden mit Lebensmitteln (Ingestion) auf dem Weg
 - 4.1. Luft – Pflanze
 - 4.2. Luft – Futterpflanze – Kuh – Milch
 - 4.3. Luft – Futterpflanze – Rind – Fleisch
 - 4.4. Luft – Muttermilch
 - 4.5. Luft – Nahrung – Muttermilch

Zur Abschätzung der zusätzlichen inneren Exposition bei Radionukliden in gelöster Form:

5. Zusätzliche Exposition durch Aufnahme von Radionukliden mit Lebensmitteln (Ingestion) auf dem Weg
 - 5.1. Trinkwasser
 - 5.2. Wasser – Fisch
 - 5.3. Viehtränke – Kuh – Milch
 - 5.4. Viehtränke – Rind – Fleisch
 - 5.5. Bewässerung – Futterpflanze – Kuh – Milch
 - 5.6. Bewässerung – Futterpflanze – Rind – Fleisch
 - 5.7. Bewässerung – Pflanze

- 5.8. Boden – Futterpflanze – Kuh – Milch
- 5.9. Boden – Futterpflanze – Rind – Fleisch
- 5.10. Boden – Pflanze
- 5.11. Muttermilch infolge der Aufnahme von Radionukliden durch die Mutter über die oben genannten Ingestionspfade
- 6. Zusätzliche Exposition durch unabsichtliche Aufnahme kontaminierten Bodens über den Mund (Bodeningestion) beim Aufenthalt auf kontaminierten Flächen

Die zusätzliche Exposition durch Betastrahlung der Luft (Betasubmersion) und die zusätzliche Exposition durch Gammastrahlung der Luft (Gammastubmersion) dürfen bei der Abschätzung der zusätzlichen äußeren Exposition unberücksichtigt bleiben.

(2) Bei Milch und Fleisch wird vereinfachend unterstellt, dass die gesamte Milchmenge ausschließlich durch Kuhmilch und die gesamte Fleischmenge ausschließlich durch Rindfleisch gedeckt werden, wobei die Rinder auf der Weide grasen oder mit Weidebewuchs gefüttert werden. Hierdurch wird die zusätzliche Exposition der repräsentativen Person konservativ abgeschätzt.

12.4.3 Abschätzung der zusätzlichen äußeren Exposition

Allgemeine Vorgaben

(1) Böden können infolge Bewässerung, Grundwasserspiegelschwankungen, Grundwasseraufstieg oder sonstige aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser, Uferstreifen durch die Ablagerung von Schwebstoffen kontaminiert werden. Die zusätzliche Jahresdosis $E_{a,r}$ durch äußere Exposition durch das Radionuklid r ergibt sich durch Gammastrahlung des Radionuklids im Boden (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Böden) und durch Gammastrahlung des Radionuklids im Ufersediment von Oberflächengewässern (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment).

(2) Die zusätzliche Exposition durch Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten und Spülfeldern darf unberücksichtigt bleiben. Ebenso dürfen die zusätzliche Exposition durch Gammastubmersion und die zusätzliche Exposition durch Betastubmersion unberücksichtigt bleiben.

(3) Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition durch das Radionuklid r ergibt sich aus der Summe der zusätzlichen Jahresdosis durch Aufenthalt auf kontaminierten Böden und der zusätzlichen Jahresdosis durch Aufenthalt auf kontaminiertem Ufersediment:

$$E_{a,r} = E_{b,r} + E_{U,r} \quad (19)$$

Hier bedeuten:

$E_{a,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition durch das Radionuklid r in Sv
$E_{b,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition bei Aufenthalt auf kontaminierten Böden durch das Radionuklid r in Sv
$E_{U,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition bei Aufenthalt auf kontaminiertem Ufersediment durch das Radionuklid r in Sv

Zusätzliche Exposition durch Gammastrahlung von Radionukliden im Boden (Gammabodenstrahlung)

(4) Gammastrahlung, die von Radionukliden im Boden ausgesandt wird, kann aus einem Umkreis von bis zu einigen hundert Metern zur äußeren Exposition beitragen. In diesem Umkreis um die Einwirkungsstelle ist von der gleichen Bodenkontamination wie an der betrachteten Einwirkungsstelle auszugehen. Wegen der Abschirmwirkung des Bodens trägt im Wesentlichen nur die oberste Bodenschicht zur Gammabodenstrahlung bei. Die flächenbezogene Kontamination der obersten Bodenschicht durch das Radionuklid r infolge Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) am Ende des k -ten Bezugsjahres $B_{k,r}(t_{1a})$ ergibt sich aus Gleichung (9) in Kapitel 12.3.3. Der Boden kann auch durch Grundwasser nahe der Geländeoberfläche oder aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser sowie durch Sediment in trockenengefallenen oder verlandeten Oberflächengewässern kontaminiert sein.

(5) Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung $E_{b,r}$ des Radionuklids r während des k -ten Bezugsjahres ergibt sich zu:

$$E_{b,r} = g_{b,r,eff} \cdot [f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}] \cdot (t_{Fr} + f_{Ge,b} \cdot t_{Ge}) \cdot B_{k,r}(t_{1a}) \quad (20)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$E_{b,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung des Radionuklids r während des k -ten Bezugsjahres in Sv
$g_{b,r,eff}$:	Dosisleistungskoeffizient für die effektive Dosis durch Gammabodenstrahlung des Radionuklids r in $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$, siehe Anhang A2.1
f_r :	Anteil des Gamma-Energieemissionsspektrums des Radionuklids r oberhalb der Energie 0,2 MeV, siehe Anhang A2
	$f_r = \frac{\sum_{E_i > 0,2 \text{ MeV}} Y_i \cdot E_i}{\sum_i Y_i \cdot E_i}$
	mit
	E_i : Gamma-Energie in MeV
	Y_i : pro Zerfall emittierte Gamma-Quanten der Energie E_i
$c_{Geo,b1}$:	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung für die Energiegruppe 1 bei der Gamma-Energie 1 MeV (dimensionslos), siehe Anhang A2
$c_{Geo,b2}$:	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung für die Energiegruppe 2 bei der Gamma-Energie 0,1 MeV (dimensionslos), siehe Anhang A2
$f_{Ge,b}$:	Reduktionsfaktor für Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt in Gebäuden (dimensionslos), siehe Anhang A4 Tabelle 11
$B_{k,r}(t_{1a})$:	Flächenbezogene Kontamination der obersten Bodenschicht durch das Radionuklid r infolge Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung), durch Grundwasser nahe der Geländeoberfläche oder aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser sowie durch Sediment in trockenengefallenen oder verlandeten Oberflächengewässern am Ende des k -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot m^{-2}$

(6) In Gleichung (20) bleibt die Abschirmwirkung des Bodens unberücksichtigt. Sofern das Tiefenprofil der Bodenkontamination hinreichend bekannt ist und plausibel begründet wird, darf die Abschirmwirkung des Bodens berücksichtigt werden.

(7) Bei signifikanten Grundwasserspiegelschwankungen, Grundwasseraufstieg oder sonstigen aufwärtsgerichteten Transportprozessen von Grundwasser ist an der ungünstigsten Einwirkungsstelle, an der ein Daueraufenthalt möglich ist, das Tiefenprofil der Kontamination des Bodens im Rahmen der Modellierungen zu bestimmen. Die daraus resultierende zusätzliche Exposition durch Gammabodenstrahlung ist nicht anhand der Gleichung (20) zu berechnen, sondern mithilfe eines Expositionsmodells nach Stand von Wissenschaft und Technik abzuschätzen.

Zusätzliche Exposition durch Gammastrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment (Gammabodenstrahlung)

(8) Bei Aufenthalt auf Ufersediment trägt wegen der Abschirmwirkung des Sediments im Wesentlichen nur die oberste Sedimentschicht zur Gammabodenstrahlung bei, d. h. die Sedimentschicht, die während einer verhältnismäßig kurzen Zeitspanne vor und während des k-ten Bezugsjahres abgelagert wurde. Diese Zeitspanne lässt sich durch die effektive Schichtdicke zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung U_r ($U_r = 0,05$ m) und der Sedimentationsgeschwindigkeit abschätzen:

$$t_{\text{eff}} = \frac{U_r}{v_{\text{Se}}} \quad (21)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

t_{eff} : Zeitspanne, während das Sediment der Dicke $U_r = 0,05$ m abgelagert wird, in s

U_r : Effektive Schichtdicke des Sediments zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung in m

(9) Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) $E_{U,r}$ bei Aufenthalt auf Ufersediment durch das Radionuklid r während des k-ten Bezugsjahres ergibt sich zu:

$$E_{U,r} = g_{b,r,\text{eff}} \cdot f_U \cdot t_A \cdot [f_r \cdot c_{\text{Geo},b1} + (1 - f_r) \cdot c_{\text{Geo},b2}] \cdot O_{k,\text{eff},r}^U \quad (22)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$E_{U,r}$: Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment durch das Radionuklid r während des k-ten Bezugsjahres in Sv

f_U : Faktor, der die endliche Geometrie des Uferstreifens gegenüber einer unendlich ausgedehnten, homogen kontaminierten Fläche berücksichtigt ($f_U = 1,0$ für unendlich ausgedehnte, homogen kontaminierte Fläche, $f_U = 0,2$ für Uferstreifen)

t_A : Jährliche Aufenthaltszeit am Ufer in s, siehe Kapitel 12.4.1 sowie Anhang A4 Tabelle 11

$O_{k,\text{eff},r}^U$: Flächenbezogene Kontamination der obersten Sedimentschicht der Dicke $U_r = 0,05$ m durch das Radionuklid r am Ende des k-ten Bezugsjahres in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$

(10) Die flächenbezogene Kontamination der obersten Sedimentschicht $O_{k,eff,r}^U$ durch das Radionuklid r am Ende des k -ten Bezugsjahres ergibt sich aus Gleichung (4) in Kapitel 12.3.3, indem diese Gleichung zwischen der unteren Integrationsgrenze $\max(k \cdot t_{1a} - t_{eff}; 0)$ und der oberen Integrationsgrenze $k \cdot t_{1a}$ integriert wird. Abgesehen von den ersten Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers wird diese Gleichung also zwischen der Zeitspanne t_{eff} vor dem Ende des k -ten Bezugsjahres und dem Ende des k -ten Bezugsjahres integriert.

(11) Die repräsentative Person hält sich im Freien entweder 760 Stunden pro Kalenderjahr auf Sediment und die restlichen 1000 Stunden pro Kalenderjahr an anderen Stellen oder 1760 Stunden pro Kalenderjahr an anderen Stellen im Freien auf. Für die Berechnung der zusätzlichen Exposition ist die insgesamt ungünstigste Variante zugrunde zu legen.

12.4.4 Abschätzung der zusätzlichen inneren Exposition

Grundsätzliche Vorgaben

(1) Die zusätzliche innere Exposition ergibt sich durch die mit der Atemluft (Exposition durch Inhalation), mit Lebensmitteln und Muttermilch sowie mit Boden (Exposition durch Ingestion) aufgenommene Aktivität, die aus dem Endlager in die Biosphäre gelangt. Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch innere Exposition durch das Radionuklid r ergibt sich aus der Summe der zusätzlichen Jahresdosis durch Inhalation und der zusätzlichen Jahresdosis durch Ingestion:

$$E_{i,r} = E_{h,r} + E_{g,r} \quad (23)$$

Hier bedeuten:

$E_{i,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch innere Exposition durch das Radionuklid r in Sv
$E_{h,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Inhalation des Radionuklids r in Sv
$E_{g,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Ingestion des Radionuklids r in Sv

Zusätzliche Exposition durch Aufnahme von Radionukliden mit der Atemluft (Inhalation)

(2) Die zusätzliche Exposition durch Inhalation des Radionuklids r ist proportional zu der am betrachteten Ort inhalierten Aktivität, die aus dem Endlager in die bodennahe Luft gelangt. Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) $E_{h,r}$ durch die Inhalation gasförmig gebundener Radionuklide und resuspendierten Staubes ist:

$$E_{h,r} = \bar{C}_r^L \cdot \dot{V} \cdot t_{1a} \cdot g_{h,r,eff} \quad (24)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

\bar{C}_r^L :	Jahresmittel der Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in der bodennahen Luft in $Bq \cdot m^{-3}$, siehe Kapitel 12.3.5
\dot{V} :	Atemrate in $m^3 \cdot s^{-1}$, siehe Kapitel 12.4.1 sowie Anhang A4 Tabelle 10 und Anlage 11 Teil B Tabelle 2 StrlSchV
$g_{h,r,eff}$:	Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Inhalation des Radionuklids r in $Sv \cdot Bq^{-1}$, siehe Anhang A2.2

(3) Bei Staub ergibt sich das Jahresmittel der Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in der bodennahen Luft aus der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden, der Staubkonzentration in der bodennahen Luft und dem Aufkonzentrierungsfaktor:

$$\bar{C}_r^L = AF_{20\mu\text{m},r} \cdot C_r^{\text{Bo}} \cdot S_{\text{St}} \quad (25)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- $AF_{20\mu\text{m},r}$: Aufkonzentrierungsfaktor für das Radionuklid r , der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität in der Staubfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) und der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden beschreibt (dimensionslos). Für kühlgemäßiges Klima darf $AF_{20\mu\text{m},r} = 4$ angesetzt werden.
- C_r^{Bo} : Spezifische Aktivität des Radionuklids r im ungesiebten Oberboden in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Trockenmasse, siehe Kapitel 12.3.2 und 12.3.4
- S_{St} : Referenzwert für die Staubkonzentration in der bodennahen Luft in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Für kühlgemäßiges Klima darf $S_{\text{St}} = 5\cdot 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ bezogen auf die Trockenmasse angesetzt werden.

(4) Zur Berechnung der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden sind die Bewässerung, Grundwasserspiegelschwankungen, Grundwasseraufstieg und sonstige aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser und bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Flächen auf Sediment zusätzlich die Kontamination des Sediments zu berücksichtigen.

(5) Es ist davon auszugehen, dass in Gebäuden die gleiche Staubkonzentration wie im Freien vorliegt. Falls für die Feinkornfraktion $< 20 \mu\text{m}$ ein Wert für die spezifische Aktivität des Radionuklids r geschätzt und plausibel begründet werden kann, ist in Gleichung (25) dieser Wert anstelle des Produkts $AF_{20\mu\text{m},r} \cdot C_r^{\text{Bo}}$ zu verwenden.

Zusätzliche Exposition durch Aufnahme von Radionukliden beim Verzehr von Lebensmitteln und Muttermilch (Ingestion)

(6) Die zusätzliche Exposition durch Ingestion ergibt sich durch die mit Lebensmitteln und Muttermilch aufgenommene Aktivität, die aus dem Endlager stammt. Für die Annahmen über die Ernährungsgewohnheiten der repräsentativen Person gilt bei kühlgemäßigem Klima Anhang A4 Tabelle 9 bzw. Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV. Bei anderen Klimata als kühlgemäßiges Klima dürfen angepasste Ernährungsgewohnheiten zugrunde gelegt werden, sofern diese plausibel und nachvollziehbar begründet werden.

(7) Die Kontamination von Lebensmitteln verringert sich bei der lebensmitteltechnologischen und haushaltsmäßigen Zubereitung. Es ist davon auszugehen, dass pflanzliche Nahrungsmittel vor der Zubereitung gewaschen werden, um anhaftende Verschmutzungen zu entfernen. Abgesehen vom Waschen pflanzlicher Nahrungsmittel bleiben alle weiteren Dekontaminationseffekte unberücksichtigt.

(8) Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) $E_{g,r}$ ist für die repräsentative Person in den Altersgruppen > 1 a:

$$E_{g,r} = (f_{\text{TW}} \cdot U^{\text{TW}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{TW}} + f_{\text{FI}} \cdot U^{\text{FI}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{FI}} + f_{\text{PF}} \cdot U^{\text{PF}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{PF}} + f_{\text{BI}} \cdot U^{\text{BI}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{BI}} + f_{\text{MI}} \cdot U^{\text{MI}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{MI}} + f_{\text{FL}} \cdot U^{\text{FL}} \cdot \tilde{C}_r^{\text{FL}}) \cdot g_{g,r,\text{eff}} \quad (26)$$

Hier bedeuten:

$E_{g,r}$:	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Ingestion des Radionuklids r in Sv
U^n :	Jährliche Verzehrsmenge der Lebensmittelgruppe n in kg, siehe Kapitel 12.4.1 sowie Anhang A4 Tabelle 9 und Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV $n = Tw$: Trinkwasser $n = Fi$: Fischfleisch (Süßwasserfisch) $n = Pf$: pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse $n = Bl$: Blattgemüse $n = Mi$: Milch und Milchprodukte $n = Fl$: Fleisch und Fleischwaren
f_n :	Anteil der Lebensmittelgruppe n , der infolge von Einträgen von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre kontaminiert ist (dimensionslos). $f_n = 1$ für Trinkwasser und Muttermilch, $f_n = 0,5$ für sonstige Lebensmittelgruppen
\tilde{C}_r^{Tw} :	Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Trinkwasser zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichungen (2) und (3) in Kapitel 12.3.3 bei Oberflächenwasser
\tilde{C}_r^{Fi} :	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fischfleisch (Süßwasserfisch) zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichung (36)
\tilde{C}_r^{Pf} :	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichung (14) in Kapitel 12.3.3 bei Bewässerung
\tilde{C}_r^{Bl} :	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Blattgemüse zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichung (14) in Kapitel 12.3.3 bei Bewässerung
\tilde{C}_r^{Mi} :	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Milch und Milchprodukten zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichungen (31) und (33)
\tilde{C}_r^{Fl} :	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Fleisch und Fleischwaren zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$, siehe Gleichungen (32) und (34)
$g_{g,r,eff}$:	Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Ingestion des Radionuklids r in $Sv \cdot Bq^{-1}$, siehe Anhang A2.2

(g) Für die repräsentative Person in der Altersgruppe ≤ 1 a ist der Verzehr von Beikost und die Aufnahme von Muttermilch bzw. Säuglingsmilch zu berücksichtigen. Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion ($g_{g,r,eff}^{MM}$) oder Inhalation ($g_{h,r,eff}^{MM}$) von Radionukliden durch die Mutter stehen nicht für alle Radionuklide zur Verfügung (siehe Anhang A2 Tabelle 4). Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) ist für die repräsentative Person der Altersgruppe ≤ 1 a daher wie folgt zu berechnen:

Stehen für das Radionuklid r die Dosiskoeffizienten $g_{g,r,eff}^{MM}$ und $g_{h,r,eff}^{MM}$ zur Verfügung, ist

$$E_{g,r} = (f_{Tw} \cdot U_{\leq 1a}^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl}) \cdot g_{g,r,eff} + A_r^{g;1a} \cdot g_{g,r,eff}^{MM} + A_r^{h;1a} \cdot g_{h,r,eff}^{MM} \quad (27)$$

Andernfalls ist

$$E_{g,r} = \left[f_{Tw} \cdot U_{\leq 1a}^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} + \frac{1}{365 \cdot a_d} \cdot (A_r^{g:1a} \cdot T_r^{MM,g} + A_r^{h:1a} \cdot T_r^{MM,h}) \cdot U^{MM} \right] \cdot g_{g,r,eff} \quad (28)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- a_d : Zeitraum eines Tages; $a_d = 1 \text{ d}$
- $A_r^{g:1a}$: Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der stillenden Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommen wird, siehe Gleichung (29)
- $A_r^{h:1a}$: Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der stillenden Mutter durch Inhalation aufgenommen wird, siehe Gleichung (30)
- $T_r^{MM,g}$: Transferfaktor von Lebensmitteln in die Muttermilch für das Radionuklid r in $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$, siehe Anhang A3 Tabelle 6. Beim Verzehr von Säuglingsmilch ist $T_r^{MM,g} = 0$ zu setzen.
- $T_r^{MM,h}$: Transferfaktor von der Atemluft in die Muttermilch für das Radionuklid r in $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$, siehe Anhang A3 Tabelle 6. Beim Verzehr von Säuglingsmilch ist $T_r^{MM,h} = 0$ zu setzen.
- U^{MM} : Jährliche Verzehrsmenge an Muttermilch in kg, siehe Kapitel 12.4.1 sowie Anhang A4 Tabelle 9 und Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV

(10) Die von der stillenden Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommene Aktivität des Radionuklids r ist wie folgt zu berechnen:

$$A_r^{g:1a} = f_{Tw} \cdot U_{>17a}^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U_{>17a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{>17a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{>17a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U_{>17a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{>17a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} \quad (29)$$

Hierbei sind für die Mutter bei kühlgemäßem Klima die mittleren jährlichen Verzehrsmengen in Anhang A4 Tabelle 9 bzw. Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV anzusetzen. Werden die jährlichen Verzehrsmengen an andere Klimata als kühlgemäßes Klima angepasst, sind für die Mutter ebenfalls mittlere jährliche Verzehrsmengen anzusetzen.

(11) Die von der stillenden Mutter durch Inhalation aufgenommene Aktivität des Radionuklids r ist wie folgt zu berechnen:

$$A_r^{h:1a} = \bar{C}_r^L \cdot \dot{V}_{>17a} \cdot t_{1a} \quad (30)$$

Kontamination von Milch und Fleisch

(12) Milch und Fleisch können durch kontaminiertes Tränkwasser und durch kontaminiertes Futter kontaminiert werden.

(13) Die spezifische Aktivität des Radionuklids r in Milch \tilde{C}_r^{Mi} und in Fleisch \tilde{C}_r^{Fl} durch Tränkwasser ergibt sich zu:

$$\tilde{C}_r^{Mi} = C_{k,r}^W \cdot L \cdot T_r^{Mi} \quad (31)$$

$$\tilde{C}_r^{Fl} = C_{k,r}^W \cdot L \cdot T_r^{Fl} \quad (32)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- L: Täglicher Wasserkonsum des Rinds in l·d⁻¹. Für kühlgemäßes Klima darf L = 100 l d⁻¹ angesetzt werden.
- T_r^{Mi}: Transferfaktor vom Tränkwasser bzw. Futter in die Milch für das Radionuklid r in d·kg⁻¹, siehe Anhang A3 Tabelle 5
- T_r^{Fl}: Transferfaktor vom Tränkwasser bzw. Futter in das Fleisch für das Radionuklid r in d·kg⁻¹, siehe Anhang A3 Tabelle 5

(14) Die Aufnahme von C-14-Kohlenstoffdioxid und anderen gasgebundenen Radionukliden (z. B. von Radon-Isotopen) im Tränkwasser ist nicht zu berücksichtigen. Kohlenstoffdioxid und Radon-Isotope können im Rind nicht in organische Verbindungen umgesetzt werden.

(15) Die spezifische Aktivität des Radionuklids r in Milch \tilde{C}_r^{Mi} und in Fleisch \tilde{C}_r^{Fl} durch kontaminiertes Futter ist zu berechnen nach:

$$\tilde{C}_r^{Mi} = C_r^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T_r^{Mi} \quad (33)$$

$$\tilde{C}_r^{Fl} = C_r^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T_r^{Fl} \quad (34)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- C_r^{Fu}: Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Futter des Rindes (Weidebewuchs) in Bq·kg⁻¹ Feuchtmasse
- \dot{M}_{Fu} : Tägliche Aufnahme von Futter (Weidebewuchs) in kg·d⁻¹ Feuchtmasse. Für kühlgemäßes Klima darf $\dot{M}_{Fu} = 70 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ angesetzt werden.

(16) Die Rinder grasen auf der Weide, werden mit frischem Weidebewuchs oder mit Lagerfutter gefüttert. Für den Bruchteil des Jahres, während dem die Rinder auf der Weide grasen oder mit frischem Weidebewuchs gefüttert werden, ist die spezifische Aktivität des Radionuklids r im Futter des Rindes die gleiche wie die spezifische Aktivität im Weidebewuchs zum Zeitpunkt des Grasens bzw. zum Zeitpunkt der Ernte:

$$C_r^{Fu} = C_r^{Wd} \quad (35)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- C_r^{Wd}: Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Weidebewuchs zum Zeitpunkt des Grasens bzw. zum Zeitpunkt der Ernte in Bq·kg⁻¹ Frischmasse, nach den Gleichungen (14) und (15) in Kapitel 12.3.3 sowie Gleichung (17) in Kapitel 12.3.5 berechnet

(17) Zwischen der Ernte von Weidebewuchs und dem Verzehr von Lagerfutter zerfallen Radionuklide und Tochternuklide werden gegebenenfalls aufgebaut. Die Verringerung der Aktivität langlebiger Radionuklide während der Lagerung des Futters darf zur Vereinfachung der Berechnung vernachlässigt werden, dem Aufbau kurzlebiger Tochternuklide ist jedoch Rechnung zu tragen. Vereinfachend wird das in Kapitel 12.1 beschriebene Verfahren angewendet, bei dem unterstellt wird, dass in einer Zerfallsreihe bzw. in einer Teilreihe die kurzlebigen Tochternuklide im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem jeweiligen langlebigen Mutternuklid stehen. Für den Bruchteil des Jahres, während dem die Rinder mit Lagerfutter gefüttert werden, ist die spezifische Aktivität im Futter der Rinder auf diese Weise zu berechnen.

Kontamination von Fischfleisch (Süßwasserfisch)

(18) Die spezifische Aktivität \tilde{C}_r^{Fi} des Radionuklids r in Fischfleisch (Süßwasserfisch) ergibt sich zu:

$$\tilde{C}_r^{\text{Fi}} = C_{k,r}^{\text{W}} \cdot T_r^{\text{Fi}} \quad (36)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

T_r^{Fi} : Konzentrationsfaktor vom Wasser in das Fischfleisch (Süßwasserfisch) für das Radionuklid r in $\text{l} \cdot \text{kg}^{-1}$, siehe Anhang A3 Tabelle 8

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

(19) Kontaminierter Boden kann unabsichtlich beim Aufenthalt auf kontaminierten Flächen über den Mund aufgenommen werden. Die zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) $E_{g,r}$ durch die Aufnahme des Radionuklids r mit kontaminiertem Boden über den Mund ist:

$$E_{g,r} = AF_{500\mu\text{m},r} \cdot C_r^{\text{Bo}} \cdot U^{\text{Bo}} \cdot g_{g,r,\text{eff}} \quad (37)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$E_{g,r}$: Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch die Aufnahme des Radionuklids r mit kontaminiertem Boden über den Mund in Sv

$AF_{500\mu\text{m},r}$: Aufkonzentrierungsfaktor für das Radionuklid r , der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität des Radionuklids r in der Bodenfraktion $< 500 \mu\text{m}$ und der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden beschreibt (dimensionslos). Für kühlgemäßes Klima darf $AF_{500\mu\text{m},r} = 2$ angesetzt werden.

U^{Bo} : Jährliche Menge von Boden, die über den Mund aufgenommen wird, in kg Trockenmasse. Für kühlgemäßes Klima dürfen die Werte der Tabelle 3 angesetzt werden.

Tabelle 3: Jährliche Menge von über den Mund aufgenommenem Boden

Altersgruppe	Bodenmenge (kg)
≤ 1 Jahr	$5,7 \cdot 10^{-4}$
> 1 - ≤ 2 Jahre	$4,6 \cdot 10^{-2}$
> 2 - ≤ 7 Jahre	$2,7 \cdot 10^{-2}$
> 7 - ≤ 12 Jahre	$7,1 \cdot 10^{-3}$
> 12 - ≤ 17 Jahre	$3,3 \cdot 10^{-3}$
> 17 Jahre	$3,3 \cdot 10^{-3}$

(20) Falls für die Feinkornfraktion < 500 µm ein Wert für die spezifische Aktivität des Radionuklids r geschätzt und plausibel begründet werden kann, ist in Gleichung (37) dieser Wert anstelle des Produkts $AF_{500\mu\text{m},r} \cdot C_r^{\text{Bo}}$ zu verwenden.

13 Literatur

BMUV (2020a) Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten vom 8. Juni 2020. AVV Tätigkeiten. Fundstelle: BAnz AT 16.06.2020 B3.

BMUV (2020b) Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094). Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV.

BMUV (2020c) Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103). Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiUntV.

Capouet, Manuel; Carter, Alexander; Ciambrella, Massimo (2019) International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 30. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA).

Deutscher Bundestag (2017) Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist. Standortauswahlgesetz - StandAG.

Deutscher Bundestag (2018) Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4645) geändert worden ist. Strahlenschutzverordnung – StrlSchV.

International Atomic Energy Agency (IAEA) (1999) Verification and Validation of Software Related to Nuclear Power Plant Instrumentation and Control. Vienna (Technical Reports Series, 384).

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2011) Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Vienna (Specific Safety Guides, SSG-14).

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012) The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Vienna (Specific Safety Guides, SSG-23).

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2019) IAEA Safety Glossary: 2018 Edition. Vienna (Non-serial Publications).

Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2019) Merkblatt zum Verständnis und über Inhalt, Aufbau und äußere Form von sicherheitstechnischen Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA). Fassung 2019-11.

Smith, Paul; Voinis, Sylvie; Griffault, Lise; Meredieu, Jean de; Kwong, Gloria; van Luik, Abraham; Bailey, Lucy; Capouet, Manuel; Depaus, Christophe; Makino, Hitoshi; Leigh, Christi; Kirkes, Ross; Leino, Jaakko; Niemeyer, Matthias; Wolf, Jens; Watson, Sarah; Franke, Bettina; Ilett, Doug; Pastina, Barbara; Weetjens, Eef (2016) Scenario Development Workshop Synopsis Integration Group for the Safety Case - June 2015. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA).

Anhang A1. Sprachliche Konventionen

(1) Sprachliche Konventionen werden in Anlehnung an das *Merkblatt zum Verständnis und über Inhalt, Aufbau und äußere Form von sicherheitstechnischen Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) in der Fassung 2019-11 (KTA 2019)* getroffen. Die für die Berechnungsgrundlage angewendeten Stelle (Anhang A des KTA-Merkblattes) ist nachfolgend für die Berechnungsgrundlage in modifizierter Form wiedergegeben. Für den Gebrauch modaler Hilfsverben gilt das Folgende:

(2) Unbedingte Anforderungen

1. Gebote:
 - a. muss - müssen
 - b. ist zu - sind zu
 - c. hat zu - haben zu
 - d. darf nur - dürfen nur
2. Verbote:
 - a. darf nicht - dürfen nicht
 - b. ist ... nicht zugelassen - sind ... nicht zugelassen
 - c. ist nicht zulässig - sind nicht zulässig

Von Geboten und Verboten als unbedingte Anforderungen darf unter keinen Umständen abgewichen werden.

(3) Bedingte Anforderungen

1. soll - sollen
2. soll nicht - sollen nicht

Wenn von bedingten Anforderungen abgewichen wird, sind die Gründe darzulegen.

(4) Erlaubnisse (Zulässigkeit)

1. darf - dürfen
2. ist ... zugelassen - sind ... zugelassen
3. ist ... zulässig - sind ... zulässig
4. muss nicht - müssen nicht
5. braucht ... nicht zu ... - brauchen ... nicht zu

aber nicht:

1. kann - können

Die Verbformen für Erlaubnisse sind anzuwenden, um eine im Rahmen der Regel (auch) zulässige Handlungsweise oder sonstige Lösung anzugeben. Erlaubnisse sind Freistellungen zur Wahl von gleichwertigen Lösungen.

(5) Empfehlungen

1. sollte - sollten
2. sollte nicht - sollten nicht

Durch Empfehlungen wird von mehreren Möglichkeiten eine als zweckmäßig empfohlen, ohne andere zu erwähnen oder auszuschließen, oder es werden bestimmte Lösungen abgewehrt, ohne sie zu verbieten.

(6) Feststellungen

über das Vorhandensein einer (physischen) Fähigkeit, einer (physikalischen oder ideellen) Möglichkeit oder eines kausalen Zusammenhangs:

1. kann - können
2. es ist möglich, dass ...
3. lässt sich ... - lassen sich...

4. vermag - vermögen

aber nicht:

1. darf - dürfen
2. ist zu ... - sind zu...

Anhang A2. Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten

A2.1 Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung

- (1) Es sind die Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung $g_{b,r,eff}$ (in $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$) sowie die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei äußerer Exposition gemäß Anlage 18 Teil B Nummer 4 StrlSchV zu verwenden.
- (2) Die Dosisleistungskoeffizienten in der oben genannten Zusammenstellung sind auf Referenzpersonen der Altersgruppe > 17 a bezogen.
- (3) Für Referenzpersonen der Altersgruppen ≤ 17 a sind wegen der geringeren Organabschirmung und der geringeren Körpergröße die jeweils genannten Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen anzuwenden.

A2.2 Inhalationsdosiskoeffizienten und Ingestionsdosiskoeffizienten

- (1) Es sind die Dosiskoeffizienten für Inhalation $g_{h,r,eff}$ (in $Sv \cdot Bq^{-1}$) und Ingestion $g_{g,r,eff}$ (in $Sv \cdot Bq^{-1}$) gemäß Anlage 18 Teil B Nummer 4 StrlSchV zu verwenden.
- (2) Für C-14 ist der Inhalationsdosiskoeffizient für CO₂ bzw. der Ingestionsdosiskoeffizient für organische Verbindungen anzuwenden. Ist die chemische Verbindung des C-14 bekannt, ist der jeweilige Inhalationsdosiskoeffizient heranzuziehen.
- (3) Bei Unkenntnis der Lungenabsorptionsklasse bzw. Ingestionsklasse der Radionuklidverbindung ist die ungünstigste Klasse den Berechnungen der zusätzlichen Folgedosis zugrunde zu legen, d. h. die Klasse, die den höchsten Beitrag zur zusätzlichen effektiven Folgedosis ergibt. Der Berechnung der zusätzlichen effektiven Folgedosis ist für jedes Radionuklid die Lungenabsorptions- bzw. Ingestionsklasse zugrunde zu legen, bei der der höchste Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis vorliegt.
- (4) Für den Muttermilchpfad sind zusätzlich die Dosiskoeffizienten in Tabelle 4 zu verwenden.

Tabelle 4: Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion ($g_{g,r,eff}^{MM}$) oder Inhalation ($g_{h,r,eff}^{MM}$) von Radionukliden durch die Mutter

Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq ⁻¹)	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq ⁻¹)
H-3	1,8·10 ⁻¹¹ (OBT) 1,1·10 ⁻¹¹ (HTO)	3,7·10 ⁻¹² (Schwebstoffe) 1,8·10 ⁻¹¹ (OBT ¹) gasförmig) 1,1·10 ⁻¹³ (tritiertes Methan) 1,0·10 ⁻¹⁵ (elementares Tritium) 1,1·10 ⁻¹¹ (HTO gasförmig)
C-14	1,8·10 ⁻¹⁰	6,3·10 ⁻¹¹ (Schwebstoffe) 1,9·10 ⁻¹⁰ (gasförmig)
Na-22	7,0·10 ⁻¹⁰	2,3·10 ⁻¹⁰
Na-24	3,0·10 ⁻¹²	1,1·10 ⁻¹²
Mg-28	1,2·10 ⁻¹⁰	7,0·10 ⁻¹¹
P-32	8,2·10 ⁻¹⁰	3,3·10 ⁻¹⁰
P-33	8,3·10 ⁻¹¹	3,3·10 ⁻¹¹
S-35	1,9·10 ⁻¹⁰	1,7·10 ⁻¹⁰

Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq⁻¹)	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq⁻¹)
K-42	$7,0 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-12}$
K-43	$6,5 \cdot 10^{-12}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$
Ca-45	$9,9 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^{-10}$
Ca-47	$7,7 \cdot 10^{-10}$	$7,1 \cdot 10^{-10}$
Fe-55	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$
Fe-59	$4,0 \cdot 10^{-11}$	$4,9 \cdot 10^{-11}$
Co-57	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$
Co-58	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$
Co-60	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
Ni-59	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$6,4 \cdot 10^{-12}$ (Schwebstoffe) $2,5 \cdot 10^{-11}$ (Nickelcarbonyl gasförmig)
Ni-63	$3,2 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$ (Schwebstoffe) $6,4 \cdot 10^{-11}$ (Nickelcarbonyl gasförmig)
Zn-65	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$
Se-75	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-10}$
Se-79	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Sr-89	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$9,3 \cdot 10^{-10}$
Sr-90	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$
Zr-95	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$
Nb-94	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Nb-95	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$9,0 \cdot 10^{-12}$
Mo-99	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
Tc-99m	$7,2 \cdot 10^{-12}$	$6,8 \cdot 10^{-12}$
Ru-103	$6,4 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$ (Schwebstoffe) $6,9 \cdot 10^{-11}$ (Ruthentetroxid)
Ru-106	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$ (Schwebstoffe) $1,1 \cdot 10^{-9}$ (Ruthentetroxid)
Ag-108m	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$8,3 \cdot 10^{-10}$
Ag-110m	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$8,3 \cdot 10^{-10}$
Sb-124	$5,7 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
Sb-125	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$7,0 \cdot 10^{-11}$
Sb-126	$3,5 \cdot 10^{-11}$	$9,1 \cdot 10^{-11}$
Sb-127	$2,1 \cdot 10^{-11}$	$5,5 \cdot 10^{-11}$
Te-127m	$6,3 \cdot 10^{-11}$	$5,7 \cdot 10^{-11}$ (Schwebstoffe) $1,7 \cdot 10^{-10}$ (gasförmig)
Te-129m	$4,7 \cdot 10^{-11}$	$4,3 \cdot 10^{-11}$ (Schwebstoffe) $1,3 \cdot 10^{-10}$ (gasförmig)
Te-131m	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-10}$ (Schwebstoffe) $2,4 \cdot 10^{-9}$ (gasförmig)
Te-132	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$ (Schwebstoffe) $5,5 \cdot 10^{-10}$ (gasförmig)

Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq⁻¹)	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq⁻¹)
I-125	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$ (Schwebstoffe) $6,2 \cdot 10^{-9}$ (Methyliodid) $7,8 \cdot 10^{-9}$ (gasförmig)
I-129	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$ (Schwebstoffe) $2,5 \cdot 10^{-8}$ (Methyliodid) $3,2 \cdot 10^{-8}$ (gasförmig)
I-131	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$9,5 \cdot 10^{-9}$ (Schwebstoffe) $2,0 \cdot 10^{-8}$ (Methyliodid) $2,5 \cdot 10^{-8}$ (gasförmig)
I-132	$9,0 \cdot 10^{-11}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$ (Schwebstoffe) $7,0 \cdot 10^{-11}$ (Methyliodid) $8,0 \cdot 10^{-11}$ (gasförmig)
I-133	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$ (Schwebstoffe) $4,0 \cdot 10^{-9}$ (Methyliodid) $5,0 \cdot 10^{-9}$ (gasförmig)
I-134	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$3,8 \cdot 10^{-12}$ (Schwebstoffe) $9,5 \cdot 10^{-12}$ (Methyliodid) $1,0 \cdot 10^{-11}$ (gasförmig)
I-135	$7,0 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$ (Schwebstoffe) $5,0 \cdot 10^{-10}$ (Methyliodid) $6,0 \cdot 10^{-10}$ (gasförmig)
Cs-134	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-10}$
Cs-136	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$
Cs-137	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$6,8 \cdot 10^{-10}$
Ba-133	$7,0 \cdot 10^{-11}$	$8,8 \cdot 10^{-11}$
Ba-140	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$
Ce-141	$8,0 \cdot 10^{-14}$	$4,0 \cdot 10^{-11}$
Ce-144	$7,6 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$
Pb-210	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Po-210	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$
Ra-224	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$
Ra-226	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Ra-228	$9,7 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
Th-228	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$
Th-230	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Th-232	$8,6 \cdot 10^{-11}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$
Th-234	$4,6 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$
U-232	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$
U-233	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$
U-234	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$
U-235	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
U-236	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
U-238	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$

Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq⁻¹)	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM}$ (Sv·Bq⁻¹)
Np-237	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Np-239	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$
Pu-238	$5,1 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Pu-239	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Pu-240	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Pu-241	$7,4 \cdot 10^{-13}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Am-241	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Am-243	$5,2 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Cm-242	$7,3 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$
Cm-244	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$

¹⁾ OBT: organisch gebundenes Tritium

Die Daten der Tabelle 4 sind der AVV Tätigkeiten entnommen. Bei einer Änderung der AVV Tätigkeiten sind die Daten der jeweils gültigen Fassung der AVV Tätigkeiten zu verwenden.

Anhang A3. Daten zur Berechnung des Radionuklidtransports in der Biosphäre

Tabelle 5: Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes

Element	T_r^{Wd} in $\frac{Bq/kg FM}{Bq/kg TM}$ (-)	T_r^{Pf}, T_r^{Bl} in $\frac{Bq/kg FM}{Bq/kg TM}$ (-)	T_r^{Mi} 1) in (d·kg ⁻¹ Milch)	T_r^{Fl} in (d·kg ⁻¹ Fleisch)
H	- 3)	- 3)	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²
Be	5·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴	1·10 ⁻³
C	- 3)	- 3)	2·10 ⁻²	4·10 ⁻²
F	3·10 ⁻²	2·10 ⁻³	2·10 ⁻³	2·10 ⁻¹
Na	4·10 ⁻¹	4·10 ⁻¹	1·10 ⁻²	8·10 ⁻²
Mg	6·10 ⁻¹	6·10 ⁻¹	4·10 ⁻³	2·10 ⁻²
Al	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻³
Si	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴	4·10 ⁻⁵
P	5·10 ⁻¹	3·10 ⁰	3·10 ⁻²	6·10 ⁻²
S	9·10 ⁻¹	9·10 ⁻¹	2·10 ⁻²	1·10 ⁻¹
Cl ⁴⁾	1·10 ^{1 4)}	1·10 ^{1 4)}	2·10 ^{-2 4)}	8·10 ^{-2 4)}
K	1·10 ⁰	1·10 ⁰	6·10 ⁻³	2·10 ⁻²
Ca	2·10 ⁻¹	6·10 ⁻²	1·10 ⁻²	1·10 ⁻³
Sc	2·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻⁶	2·10 ⁻²
V	3·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁵	3·10 ⁻³
Cr	4·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴	3·10 ⁻³	1·10 ⁻²
Mn	1·10 ⁻¹	1·10 ⁻¹	3·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁴
Fe	5·10 ⁻³	5·10 ⁻³	4·10 ⁻⁵	2·10 ⁻²
Co	9·10 ⁻³	1·10 ⁻²	2·10 ⁻⁴	1·10 ⁻²
Ni	5·10 ⁻²	5·10 ⁻²	1·10 ⁻²	2·10 ⁻³
Cu	2·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	2·10 ⁻³	1·10 ⁻²
Zn	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	3·10 ⁻³	2·10 ⁻¹
Ga	3·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁵	5·10 ⁻¹
Ge	2·10 ⁻¹	6·10 ⁻¹	5·10 ⁻⁴	5·10 ⁻¹
As	6·10 ⁻³	2·10 ⁻³	7·10 ⁻⁵	2·10 ⁻³
Se	5·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	4·10 ⁻³	2·10 ⁻²
Br	1·10 ⁻¹	3·10 ⁻¹	5·10 ⁻²	3·10 ⁻²
Rb	9·10 ⁻¹	9·10 ⁻²	6·10 ⁻³	1·10 ⁻²
Sr	3·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	1·10 ⁻³	1·10 ⁻³

Element	T_r^{Wd} in $\frac{Bq/kg FM}{Bq/kg TM}$ ²⁾ (-)	T_r^{Pf}, T_r^{Bl} in $\frac{Bq/kg FM}{Bq/kg TM}$ ²⁾ (-)	$T_r^{Mi 1)}$ in (d·kg ⁻¹ Milch)	T_r^{Fl} in (d·kg ⁻¹ Fleisch)
Y	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	1·10 ⁻⁵	1·10 ⁻³
Zr	1·10 ⁻³	3·10 ⁻³	4·10 ⁻⁶	2·10 ⁻²
Nb	1·10 ⁻²	1·10 ⁻²	3·10 ⁻³	3·10 ⁻¹
Mo	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	1·10 ⁻³	7·10 ⁻³
Tc	2·10 ¹	6·10 ⁰	1·10 ⁻⁵	4·10 ⁻²
Ru	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	9·10 ⁻⁶	2·10 ⁻³
Rh	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	1·10 ⁻²	2·10 ⁻³
Pd	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	1·10 ⁻²	4·10 ⁻³
Ag	2·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻²	2·10 ⁻³
Cd	8·10 ⁻¹	8·10 ⁻¹	2·10 ⁻⁴	6·10 ⁻³
In	3·10 ⁻¹	3·10 ⁻¹	1·10 ⁻⁴	8·10 ⁻³
Sn	2·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	3·10 ⁻³	8·10 ⁻²
Sb	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	2·10 ⁻³	1·10 ⁻³
Te	2·10 ⁰	2·10 ⁰	3·10 ⁻⁴	8·10 ⁻²
I	1·10 ⁻¹	2·10 ⁻²	5·10 ⁻³	7·10 ⁻³
Cs	5·10 ⁻²	1·10 ⁻²	5·10 ⁻³	2·10 ⁻²
Ba	2·10 ⁻¹	3·10 ⁻²	2·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴
La	3·10 ⁻³	3·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻³
Ce	7·10 ⁻²	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻³
Pr	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Nd	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Pm	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Sm	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Eu	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Gd	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Tb	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Dy	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	6·10 ⁻³
Ho	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Er	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Tm	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³
Yb	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻³
Lu	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³

Element	T_r^{Wd} in $\frac{Bq/kg FM}{Bq/kg TM}$ ²⁾ (-)	T_r^{Pf}, T_r^{Bl} in $\frac{Bq/kg FM}{Bq/kg TM}$ ²⁾ (-)	T_r^{Mi} ¹⁾ in (d·kg ⁻¹ Milch)	T_r^{Fl} in (d·kg ⁻¹ Fleisch)
Hf	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁶	4·10 ⁻¹
Ta	7·10 ⁻³	7·10 ⁻³	3·10 ⁻⁶	5·10 ⁻¹
W	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	2·10 ⁻⁴	4·10 ⁻²
Re	3·10 ⁻¹	3·10 ⁻¹	2·10 ⁻³	8·10 ⁻³
Os	5·10 ⁻²	5·10 ⁻²	5·10 ⁻³	4·10 ⁻¹
Ir	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	5·10 ⁻³	2·10 ⁻³
Pt	5·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	5·10 ⁻³	4·10 ⁻³
Au	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	6·10 ⁻⁶	3·10 ⁻³
Hg	7·10 ⁻²	2·10 ⁻¹	1·10 ⁻⁵	3·10 ⁻¹
Tl	3·10 ⁻¹	3·10 ⁻¹	2·10 ⁻³	4·10 ⁻²
Pb	2·10 ⁻²	1·10 ⁻²	2·10 ⁻⁴	7·10 ⁻⁴
Bi	2·10 ⁻¹	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻⁴	2·10 ⁻²
Po	2·10 ⁻²	8·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	5·10 ⁻³
At	3·10 ⁻¹	3·10 ⁻¹	5·10 ⁻²	5·10 ⁻¹
Ra	1·10 ⁻²	1·10 ⁻²	4·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁴
Ac	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	6·10 ⁻²
Th	2·10 ⁻²	5·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁴
Pa	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻³
U	9·10 ⁻³	4·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴	4·10 ⁻⁴
Np	1·10 ⁻²	3·10 ⁻³	5·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁴
Pu	1·10 ⁻⁴	6·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁶
Am	3·10 ⁻⁴	1·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁴
Cm	2·10 ⁻⁴	9·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁴
Bk	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁴
Cf	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁴

¹⁾ Für diesen Transferfaktor wird in der Literatur üblicherweise die Einheit d·l⁻¹ verwendet.

²⁾ FM = Feuchtmasse

TM = Trockenmasse

³⁾ Entfällt, Berechnung erfolgt nach dem spezifischen Aktivitätsmodell

⁴⁾ Der Transfer von Cl-36 kann alternativ auch über das spezifische Aktivitätsmodell berechnet werden. Das spezifische Aktivitätsmodell ist bei höheren Chloridgehalten im Boden oder im Tränkwasser zu bevorzugen.

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

Die Daten der Tabelle 5 sind der StrlSchV entnommen.

Tabelle 6: Transferfaktoren zur Berechnung des Übergangs inkorporierter Radionuklide in die Muttermilch

Element	$T_r^{MM,g \ 1)}$ (d·kg ⁻¹ Muttermilch)	$T_r^{MM,h \ 1)}$ (d·kg ⁻¹ Muttermilch)
H	0,5	0,2 (Schwebstoffe) 0,5 (HTO, OBT) 0,005 (tritiertes Methan) 5·10 ⁻⁵ (elementares Tritium)
Be	0,006	0,1
C	0,3	0,1 (Schwebstoffe, CO) 0,3 (CO ₂ , Kohlenstoffdampf)
F	0,02	0,007
Na	0,05	0,02
Mg	0,1	0,06
Al	0,02	0,3
Si	0,2	0,3
P	0,1	0,04
S	0,2	0,07 (Schwebstoffe, anorganisch) 0,2 (CS ₂ , SO ₂)
Cl	0,08	0,03
K	0,2	0,07
Ca	0,4	0,3
Sc	0,1	0,01
V	0,04	0,3
Cr	0,2	0,3
Mn	0,002	0,005
Fe	0,04	0,1
Co	0,1	0,3
Ni	0,3	0,3 (Schwebstoffe) 1 (Nickelcarbonyl)
Cu	0,2	0,1
Zn	0,2	0,1
Ga	0,02	0,3
Ge	1	0,4
As	0,1	0,04
Se	0,3	0,1
Br	0,07	0,03
Rb	0,4	0,1

Element	$T_r^{MM,g \ 1)}$ (d·kg ⁻¹ Muttermilch)	$T_r^{MM,h \ 1)}$ (d·kg ⁻¹ Muttermilch)
Sr	0,1	0,09
Y	0,02	0,1
Zr	0,07	0,3
Nb	0,02	0,3
Mo	0,03	0,01
Tc	0,6	0,4
Ru	0,03	0,2 (Schwebstoffe) 0,6 (Ruthentetroxid)
Rh	0,3	0,3
Pd	0,3	0,3
Ag	0,2	0,3
Cd	0,2	0,3
In	0,02	0,3
Sn	0,004	0,05
Sb	0,04	0,1
Te	0,4	0,3 (Schwebstoffe) 1 (elementares Tellur)
I	0,6	0,2 (Schwebstoffe) 0,6 (elementares Iod) 0,4 (Methyliodid)
Cs	0,3	0,1
Ba	0,02	0,03
La	0,03	0,3
Ce	0,03	0,3
Pr	0,03	0,1
Nd	0,03	0,1
Pm	0,03	0,1
Sm	0,03	0,1
Eu	0,03	0,1
Gd	0,03	0,3
Tb	0,03	0,1
Dy	0,03	0,1
Ho	0,03	0,1
Er	0,03	0,1
Tm	0,03	0,1
Yb	0,03	0,1
Lu	0,03	0,1
Hf	0,002	0,3
Ta	0,001	0,1
W	0,4	0,3

Element	$T_r^{MM,g \ 1)}$ (d·kg ⁻¹ Muttermilch)	$T_r^{MM,h \ 1)}$ (d·kg ⁻¹ Muttermilch)
Re	0,9	0,4
Os	0,1	0,3
Ir	0,1	0,3
Pt	0,1	0,3
Au	0,1	0,3
Hg	0,2	0,3 (Schwebstoffe, anorganisch) 0,8 (Quecksilberdampf) 0,1 (Schwebstoffe, organisch)
Tl	1	0,4
Pb	0,2	0,3
Bi	0,06	0,3
Po	0,6	0,3
At	1	0,4
Ra	0,2	0,3
Ac	6·10 ⁻⁴	0,3
Th	0,02	0,3
Pa	6·10 ⁻⁴	0,1
U	0,02	0,2
Np	6·10 ⁻⁴	0,3
Pu	6·10 ⁻⁴	0,3
Am	6·10 ⁻⁴	0,3
Cm	6·10 ⁻⁴	0,3
Bk	6·10 ⁻⁴	0,1
Cf	6·10 ⁻⁴	0,1

¹⁾ Für diesen Transferfaktor wird in der Literatur üblicherweise die Einheit d·l⁻¹ verwendet.

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

Die Transferfaktoren für den Inhalationspfad wurden für die ungünstigste Lungenabsorptionsklasse berechnet. Es können daher Abweichungen zu anderen Berechnungsvorschriften auftreten. Die Daten der Tabelle 6 sind der StrlSchV entnommen.

Tabelle 7: Daten für die Anlagerung von Radionukliden in Oberflächengewässern an Schwebstoffe

Elementgruppe	$K_{Se,r}$ (l·kg ⁻¹)	$T_{Anl,r}$ (d)	$\lambda_{Anl,r}$ (s ⁻¹)	Elemente
1	200	0	-	Sr, Tc, Te, Nb
2	5000	1,5	$5 \cdot 10^{-6}$	Cs, Zn, Y, La, I, Sb, Ra
3	18000	2,5	$3 \cdot 10^{-6}$	Co, Ce, Ru, Mn, Cr, Fe, Zr, Ni, Ag, Aktiniden

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

Die Daten der Tabelle 7 sind der StrlSchV entnommen.

Tabelle 8: Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch (Süßwasserfisch)

Element	Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} in l·kg ⁻¹ Festwert	Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} in l·kg ⁻¹ Gleichung ¹⁾
H	1	
C	8000 ²⁾	
Na	75	
Mg	40	
Al	50	
P	2000	$2 \cdot 10^5 / (P)_w$
Cl	45	
K	3000	$4,88 \cdot 10^6 / (K)_w$
Ca	10	$7,22 \cdot 10^5 / (Ca)_w^{1,2}$
Sc	200	
Ti	200	
V	100	
Cr	40	
Mn	100	$137 / (Mn)_w^{0,9}$
Fe	100	$14500 / (Fe)_w^{1,22}$
Co	75	$3,29 / (Co)_w^{0,74}$
Ni	20	
Cu	250	
Zn	400	$5160 / (Zn)_w$
As	350	

Element	Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} in l·kg ⁻¹ Festwert	Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} in l·kg ⁻¹ Gleichung ¹⁾
Se	6000	
Br	90	
Rb	5000	
Sr	3	$7,22 \cdot 10^5 / (Ca)_W^{1,2}$
Y	40	
Zr	20	
Nb	200	
Mo	2	
Tc	80	
Ru	100	
Ag	10	$1,25 / (Ag)_W^{0,85}$
Cd	200	
Sn	3000	
Sb	35	
I	30	
Cs	2500	$4,88 \cdot 10^6 / (K)_W$
Ba	1	
La	35	
Ce	25	
Pm	25	
Eu	150	
Tb	400	
Hf	1000	
Au	250	
Hg	6000	
Tl	900	
Pb	25	
Bi	15	
Po	35	
Ra	4	
Th	30	

Element	Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} in $l \cdot kg^{-1}$ Festwert	Konzentrationsfaktor T_r^{Fi} in $l \cdot kg^{-1}$ Gleichung ¹⁾
U	1	
Np	10	
Pu	8	
Am	25	
Cm	25	

¹⁾ $(P)_w, (K)_w, (Ca)_w, (Mn)_w, (Fe)_w, (Co)_w, (Zn)_w$ und $(Ag)_w$ ist die jeweilige Elementkonzentration im Wasser in $\mu g \cdot l^{-1}$

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

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

Elemente, die nicht aufgeführt sind, sind gemäß ihrer chemischen Verwandtschaft den angegebenen Elementen zuzuordnen.

Die Daten der Tabelle 8 sind der StrlSchV entnommen.

Anhang A4. Lebensgewohnheiten der repräsentativen Person

A4.1 Jährliche Verzehrsmengen der repräsentativen Person

Tabelle 9: Jährliche Verzehrsmengen der repräsentativen Person

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

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

²⁾ Je nach Nuklidzusammensetzung ist die ungünstigste Ernährungsvariante zugrunde zu legen.

³⁾ Der Anteil von Süßwasserfisch am Gesamtfischverzehr beträgt im Mittel ca. 17 % und ist den regionalen Besonderheiten anzupassen.

Für die Lebensmittelgruppe, die bei mittleren jährlichen Verzehrsmengen (Spalten 2 bis 7 der Tabelle 9) zur höchsten zusätzlichen Ingestionsdosis (effektive Folgedosis) führt, ist zur Berücksichtigung des 95. Perzentils die mittlere jährliche Verzehrsmenge mit dem Faktor in Spalte 8 der Tabelle 9 zu multiplizieren. Zur Festlegung der dosisdominierenden Lebensmittelgruppe sind alle pflanzlichen Nahrungsmittel außer Blattgemüse zu einer Lebensmittelgruppe zusammenzufassen. Für alle übrigen, nicht dosisdominierenden Lebensmittelgruppen sind die mittleren jährlichen Verzehrsmengen anzusetzen.

Beim Verzehr von Muttermilch und Säuglingsmilch (Milchfertigprodukte mit Trinkwasser) während des ersten Lebensjahres sind zwei signifikante Stellen für den Faktor in Spalte 8 sinnvoll. Dies gilt nicht für die übrigen Lebensmittelgruppen, bei denen die Faktoren in Spalte 8 für alle sechs Altersgruppen abdeckend sind.

Die Daten der Tabelle 9 sind der StrlSchV entnommen. Werden die jährlichen Verzehrsmengen an andere Klimata als kühlgemäßigtes Klima angepasst, sind diese Anpassungen plausibel und nachvollziehbar zu begründen.

A4.2 Atemraten der repräsentativen Person

Tabelle 10: Atemraten der repräsentativen Person

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

Die Daten der Tabelle 10 sind der StrlSchV entnommen und sind für kühlgemäßigtes Klima anzuwenden. Werden die Atemraten an andere Klimata als kühlgemäßigtes Klima angepasst, sind diese Anpassungen plausibel und nachvollziehbar zu begründen.

Tabelle 11: Aufenthaltszeiten der repräsentativen Person und Reduktionsfaktoren

Expositionspfade	Aufenthaltsdauern und -orte	Reduktionsfaktor
Gammastrahlung der Radionuklide im Boden	$6,3 \cdot 10^6$ s (1760 h) pro Kalenderjahr im Freien	1
	$2,5 \cdot 10^7$ s (7000 h) pro Kalenderjahr in Gebäuden	0,3
Inhalation von Radionukliden	$6,3 \cdot 10^6$ s (1760 h) pro Kalenderjahr im Freien	1
	$2,5 \cdot 10^7$ s (7000 h) pro Kalenderjahr in Gebäuden	1
Aufenthalt auf Sediment	$2,7 \cdot 10^6$ s (760 h) pro Kalenderjahr	1

Für die Berechnung der zusätzlichen Exposition sind bei kühlgemäßigem Klima die in Anhang A4 Tabelle 11 genannten Zahlenwerte für die jeweiligen Expositionspfade zu verwenden. Für den Aufenthalt im Freien sind folgende Fälle zu betrachten:

1. Die repräsentative Person hält sich im Freien entweder 760 Stunden pro Kalenderjahr auf Sediment und die restlichen 1000 Stunden pro Kalenderjahr an anderen Stellen oder
2. 1760 Stunden pro Kalenderjahr an anderen Stellen im Freien auf.

Für die Berechnung der zusätzlichen Exposition ist die insgesamt ungünstigste Variante zugrunde zu legen.

Die Daten der Tabelle 11 sind der StrlSchV entnommen und sind für kühlgemäßigtes Klima anzuwenden. Werden die Aufenthaltszeiten an andere Klimata als kühlgemäßigtes Klima angepasst, sind diese Anpassungen plausibel und nachvollziehbar zu begründen.

Anhang A5. Symbolverzeichnis

Symbol	Definition
a_d	Zeitraum eines Tages: $a_d = 1 \text{ d}$
$a_{ri-1,ri}$	Anteil der Zerfälle des Radionuklids $ri-1$, die zum Radionuklid ri führen (dimensionslos)
a_w	Umrechnungsfaktor zur Umrechnung der Zeit- und Volumeneinheiten: $a_w = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$
$A_{k,r}$	In das Fließgewässer transportierte Aktivität des Radionuklids r im k -ten Bezugsjahr in Bq Eintrag des Radionuklids r in das stehende Gewässer durch Grundwasser im k -ten Bezugsjahr in Bq
$A_r^{g;1a}$	Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der stillenden Mutter durch Ingestion von Lebensmitteln aufgenommen wird
$A_r^{h;1a}$	Aktivität des Radionuklids r in Bq, die jährlich von der stillenden Mutter durch Inhalation aufgenommen wird
$AF_{20\mu\text{m},r}$	Aufkonzentrierungsfaktor für das Radionuklid r , der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität in der Staubfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) und der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden beschreibt (dimensionslos)
$AF_{500\mu\text{m},r}$	Aufkonzentrierungsfaktor für das Radionuklid r , der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität des Radionuklids r in der Bodenfraktion $< 500 \mu\text{m}$ und der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden beschreibt (dimensionslos)
B_l	Im Monat l benötigte Wassermenge für Bewässerungszwecke in mm
$B_{k,ri}(t)$	Flächenbezogene Bodenkontamination im Wurzelbereich durch das Radionuklid ri im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
$B_{k,r}(t_{1a})$	Flächenbezogene Kontamination der obersten Bodenschicht durch das Radionuklid r infolge Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung), durch Grundwasser nahe der Geländeoberfläche oder aufwärtsgerichtete Transportprozesse von Grundwasser sowie durch Sediment in trocken gefallen oder verlandeten Oberflächengewässern am Ende des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
$c_{\text{Geo},b1}$	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung für die Energiegruppe 1 bei der Gamma-Energie 1 MeV (dimensionslos)
$c_{\text{Geo},b2}$	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung für die Energiegruppe 2 bei der Gamma-Energie 0,1 MeV (dimensionslos)
C_C^L	Kohlenstoffkonzentration der Luft in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\bar{C}_{k,r}^{\text{Sch}}$	Mittlere spezifische Aktivität des Radionuklids r in Schwebstoffen im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Trockenmasse
$\bar{C}_{k,r}^W$	Mittlere Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im Bewässerungswasser während des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$
$\bar{C}_{k,C-14}^W$	Mittlere Aktivitätskonzentration von gasförmig im Bewässerungswasser gelöstem C-14 im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$
$C_{k,C-14}^n$	Spezifische Aktivität von C-14 in Pflanzen der Gruppe n am Ende des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse
$\bar{C}_{k,C-14}^S$	Mittlere Aktivitätskonzentration von C-14 in Form von CO_2 in der bodennahen Luft während der Wachstumsphase der Pflanzen im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

Symbol	Definition
$C_{k,r}^j$	Mittlere Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im Zufluss j während des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
$C_{k,r}^m(t_{1a})$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Wurzelbereich am Ende des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Trockenmasse; $m = A$ für Ackerboden, $m = Wd$ für Weideboden
$C_{k,r}^n$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in und auf Pflanzen der Gruppe n am Ende des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse $n = \text{Bl}$ Blattgemüse $n = \text{Pf}$ pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse $n = \text{Wd}$ Weidepflanzen
C_{r}^{Bo}	Spezifische Aktivität des Radionuklids r im ungesieberten Oberboden in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Trockenmasse
C_{r}^{Fu}	Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Futter der Rinder (Weidebewuchs) in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse
$\bar{C}_{\text{r}}^{\text{L}}$	Jahresmittel der Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in der bodennahen Luft in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
\tilde{C}_{r}^n	Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Lebensmittel der Gruppe n zum Zeitpunkt des Verzehrs in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ $n = \text{Tw}$ Trinkwasser $n = \text{Fi}$ Fischfleisch (Süßwasserfisch) $n = \text{Pf}$ pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse $n = \text{Bl}$ Blattgemüse $n = \text{Mi}$ Milch und Milchprodukte $n = \text{Fl}$ Fleisch und Fleischwaren
$C_{k,r}^{\text{Sch}}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in Schwebstoffen im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Trockenmasse
$C_{k,r}^{\text{W}}$	Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im Fließgewässer (ungefiltertes Wasser) im k -ten Bezugsjahr in $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im stehenden Gewässer (ungefiltertes Wasser) am Ende des k -ten Bezugsjahres in $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
C_{r}^{Wd}	Spezifische Aktivität des Radionuklids r im Weidebewuchs zum Zeitpunkt des Grasens bzw. zum Zeitpunkt der Ernte in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ Frischmasse
$E_{a,r}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition durch das Radionuklid r in Sv
$E_{a,r,j}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) im Lebensjahr j durch äußere Exposition durch das Radionuklid r in Sv
$E_{b,r}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition bei Aufenthalt auf kontaminierten Böden durch das Radionuklid r in Sv Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung des Radionuklids r während des k -ten Bezugsjahres in Sv
$E_{g,r}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Ingestion des Radionuklids r in Sv Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch die Aufnahme des Radionuklids r mit kontaminiertem Boden über den Mund in Sv
$E_{h,r}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Inhalation des Radionuklids r in Sv
E_{i}	Gamma-Energie in MeV
$E_{i,r}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch innere Exposition durch das Radionuklid r in Sv

Symbol	Definition
\bar{E}_{Jahr}	Über die Lebenszeit gemittelte zusätzliche effektive Dosis im Kalenderjahr (gemittelte zusätzliche Jahresdosis) in Sv
$E_{U,r}$	Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch äußere Exposition bei Aufenthalt auf Ufersediment durch das Radionuklid r in Sv Zusätzliche Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment durch das Radionuklid r während des k-ten Bezugsjahres in Sv
f_C^n	Massenanteil des Kohlenstoffs in Pflanzen der Gruppe n (dimensionslos)
F_l	Mittlere monatliche relative Luftfeuchte im Monat l in %
$f_{Ge,b}$	Reduktionsfaktor für Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt in Gebäuden (dimensionslos)
f_n	Anteil der Lebensmittelgruppe n, der infolge von Einträgen von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre kontaminiert ist (dimensionslos)
f_r	Anteil des Gamma-Energieemissionsspektrums des Radionuklids r oberhalb der Energie 0,2 MeV (dimensionslos)
f_U	Faktor, der die endliche Geometrie des Uferstreifens gegenüber einer unendlich ausgedehnten, homogen kontaminierten Fläche berücksichtigt (dimensionslos)
f_W	Anteil der durch Beregnung auf der Pflanze abgelagerten Aktivität (dimensionslos)
$g_{b,r,eff}$	Dosisleistungskoeffizient für die effektive Dosis durch Gammabodenstrahlung des Radionuklids r in $\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
$g_{g,r,eff}$	Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Ingestion des Radionuklids r in $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$
$g_{h,r,eff}$	Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Inhalation des Radionuklids r in $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$
j	Index zur Kennzeichnung des Lebensjahres (j=1 ... 70) Index zur Kennzeichnung des Zuflusses des stehenden Gewässers
k	Index zur Kennzeichnung des Bezugsjahres
$K_{Se,r}$	Konzentrationsfaktor für Schwebstoffe für das Radionuklid r in $\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}$
l	Index zur Kennzeichnung des Monats eines Bezugsjahres
L	Täglicher Wasserkonsum des Rinds in $\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$
$\lambda_{Anl,r}$	Anlagerungskonstante des Radionuklids r an Schwebstoffe in s^{-1}
$\lambda_{eff,k,r}^{Gew}$	Effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r im stehenden Gewässer während des k-ten Bezugsjahres in s^{-1}
$\lambda_{m,ri}$	Verweilkonstante des Radionuklids ri im Wurzelbereich der Pflanzen aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten in s^{-1}
λ_r	Physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r in s^{-1}
λ_V	Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze in s^{-1}
m	Index zur Kennzeichnung des Bodens m = A für Ackerboden m = Wd für Weideboden
\dot{M}_{Fu}	Tägliche Aufnahme von Futter (Weidebewuchs) in $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ Feuchtmasse
MQ_k	Mittlerer Abfluss (Mittelwasser) des Fließgewässers im k-ten Bezugsjahr in $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
MQ_k^j	Mittlerer Abfluss (Mittelwasser) des Zuflusses j während des k-ten Bezugsjahres in $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Symbol	Definition
n	Index zur Kennzeichnung der Lebens- bzw. Futtermittelgruppe: $n = Pf$ für pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse $n = Bl$ für Blattgemüse $n = Mi$ für Milch und Milchprodukte $n = Fl$ für Fleisch und Fleischwaren $n = Fi$ für Fischfleisch (Süßwasserfisch) $n = Tw$ für Trinkwasser $n = MM$ für Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser $n = Wd$ für Weidebewuchs
$O_{k,ri}(t)$	Flächenbezogene Aktivität des Radionuklids r_i im Ufersediment im k -ten Bezugsjahr in $Bq \cdot m^{-2}$
$O_{k,eff,r}^U$	Flächenbezogene Kontamination der obersten Sedimentschicht der Dicke $U_r = 0,05$ m durch das Radionuklid r am Ende des k -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot m^{-2}$
p^m	Flächentrockenmasse des Bodens in $kg \cdot m^{-2}$; $m = A$ für Ackerboden, $m = Wd$ für Weideboden
P_l	Mittlerer monatlicher Niederschlag im Monat l in mm
$\dot{Q}_{U,k,ri}$	Flächenbezogene Eintragsrate des Radionuklids r_i durch Sedimentation im k -ten Bezugsjahr in $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$\dot{Q}_{W,k,ri}$	Flächenbezogene Eintragsrate des Radionuklids r_i durch Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) im k -ten Bezugsjahr in $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
r	Index zur Kennzeichnung des Radionuklids
r_i	Index zur Kennzeichnung der Radionuklide innerhalb der Zerfallsreihe
ρ_{Se}	Dichte des Sediments in $kg \cdot m^{-3}$ Trockenmasse
S_{St}	Referenzwert für die Staubkonzentration in der bodennahen Luft in $kg \cdot m^{-3}$
t_A	Jährliche Aufenthaltszeit am Ufer in s
t_{eff}	Zeitspanne, während der Sediment der Dicke $U_r = 0,05$ m abgelagert wird, in s
t_f	Zeit zwischen dem Eintritt des Radionuklids r in das Oberflächengewässer und der Entnahme des Wassers zur Bewässerung (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) sowie zur Nutzung als Trinkwasser und Tränkwasser in s
t_{Wn}^n	Vom Klima abhängige Zeitdauer, während der Pflanzen der Gruppe n während der Wachstumsperiode infolge Beregnung oberirdisch kontaminiert werden, in s $n = Wd$ Zeit bis zum erneuten Abweiden desselben Weidestücks $n = Pf, Bl$ mittlere Vegetationszeit von pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse und von Blattgemüse
t_{1a}	Zeitdauer eines Jahres in s
$T_{Anl,r}$	Halbwertszeit für die Anlagerung des Radionuklids r an Schwebstoffe in Oberflächengewässern in s
T_l	Mittlere monatliche Lufttemperatur im Monat l in $^{\circ}C$
T_R^{Fi}	Konzentrationsfaktor vom Wasser in das Fischfleisch (Süßwasserfisch) für das Radionuklid r in $l \cdot kg^{-1}$
T_R^{Fl}	Transferfaktor vom Tränkwasser bzw. Futter in das Fleisch für das Radionuklid r in $d \cdot kg^{-1}$
T_R^{Mi}	Transferfaktor vom Tränkwasser bzw. Futter in die Milch für das Radionuklid r in $d \cdot kg^{-1}$

Symbol	Definition
$T_r^{MM,g}$	Transferfaktor von Lebensmitteln in die Muttermilch für das Radionuklid r in $d \cdot kg^{-1}$
$T_r^{MM,h}$	Transferfaktor von der Atemluft in die Muttermilch für das Radionuklid r in $d \cdot kg^{-1}$
T_r^n	Transferfaktor vom Boden zur Pflanze der Gruppe n für das Radionuklid r in $Bq \cdot kg^{-1}$ Feuchtmasse pro $Bq \cdot kg^{-1}$ Trockenboden, jeweils für pflanzliche Nahrungsmittel ($n = Pf, Bl$) oder für Weidepflanzen ($n = Wd$)
T_V	Halbwertszeit für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze in s
U^{Bo}	Jährliche Menge von Boden, der über den Mund aufgenommen wird, in kg Trockenmasse
U^{MM}	Jährliche Verzehrsmenge an Muttermilch in kg
U^n	Jährliche Verzehrsmenge der Lebensmittelgruppe n in kg $n = Tw$ Trinkwasser $n = Fi$ Fischfleisch (Süßwasserfisch) $n = Pf$ pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse $n = Bl$ Blattgemüse $n = Mi$ Milch und Milchprodukte $n = Fl$ Fleisch und Fleischwaren
U_r	Effektive Schichtdicke des Sediments zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung in m
v_{Se}	Sedimentationsgeschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$
\dot{V}	Atemrate in $m^3 \cdot s^{-1}$
V_C	Assimilationsrate für Kohlenstoff in $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
V_{Gew}	Volumen des stehenden Gewässers in m^3
W_k	Vom Klima abhängige Bewässerungsrate (Beregnung und sonstige Formen der Bewässerung) während der Wachstumszeit von Weidebewuchs und pflanzlichen Nahrungsmitteln (Vegetationsperiode) im k-ten Bezugsjahr in $l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
Y_i	pro Zerfall emittierte Gamma-Quanten der Energie E_i
Y^n	Ertrag bzw. Bewuchsdichte von Pflanzen der Gruppe n in $kg \cdot m^{-2}$ Feuchtmasse $n = Bl$ Ertrag von Blattgemüse $n = Pf$ Ertrag von pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse $n = Wd$ Bewuchsdichte von Weidepflanzen

