



# Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen

- Entwurfsfassung inklusive Erläuterungen -  
Stand 31. Juli 2020

Erstellt durch das  
Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)  
und das  
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)  
im Auftrag des  
Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare  
Sicherheit (BMU)



### VORWORT

Der vorliegende Entwurf 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 und nukleare Sicherheit (BMU) erstellt.

Das Ziel der Berechnungsgrundlage ist die regulatorische Festlegung von Anforderungen und Vorgehensweisen, die der Vorhabenträger 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.

Die Federführung und die Gesamtverantwortung für dieses Dokument 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 8.5, das Kapitel 12 sowie Anhang A2 bis Anhang A5.



## Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Anwendungsbereich
  - 2.1 Beschreibung des Anwendungsbereichs
  - 2.2 Abgrenzung des Anwendungsbereichs
- 3 Begriffsbestimmungen
- 4 Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis
  - 4.1 Ziele
  - 4.2 Grundsätze
- 5 Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung
- 6 Systematik und Typen von Modellen
- 7 Potentielle Entwicklungen des Endlagers
- 8 Umgang mit Ungewissheiten
  - 8.1 Allgemeines
  - 8.2 Übergeordnete Vorgaben
  - 8.3 Spezifische Vorgaben
    - 8.3.1 Informationsquellen
    - 8.3.2 Qualität der Daten und Komplexität der Modelle
    - 8.3.3 Nicht-Wissen und Fehler
    - 8.3.4 Plausibilität von Informationen
    - 8.3.5 Berücksichtigung von Abhängigkeiten
    - 8.3.6 Aggregation und Übertragung
  - 8.4 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse
  - 8.5 Besonderheiten der Biosphärenmodellierung
- 9 Radionuklidinventar und Auswahlprozess
- 10 Geosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung
  - 10.1 Übergeordnete Aspekte der Geosphärenmodellierung
  - 10.2 Modellbildung
    - 10.2.1 Methodische Grundlagen
    - 10.2.2 Quellterm und Darstellung möglicher Radionuklidaustragungen
    - 10.2.3 Modelle der Mobilisierung von Radionukliden
    - 10.2.4 Modelle des Transports von Radionukliden
    - 10.2.5 Modelle für weitere Prozesse zur Unterstützung der Modelle für Mobilisierung und Transport in der Geosphäre
  - 10.3 Qualifizierung von Berechnungsmodellen und mathematischen Modellen
- 11 Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell für die Dosisabschätzung
- 12 Biosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung



12.1 Übergeordnete Aspekte der Biosphärenmodellierung

12.2 Klima

12.3 Ausbreitung von Radionukliden und Umweltkontamination

12.3.1 Grundwasser

12.3.2 Abschätzung des Wasserdefizits für die Landwirtschaft

12.3.3 Oberflächengewässer

12.3.4 Kontamination der bodennahen Luft

12.4 Exposition der repräsentativen Person

12.4.1 Expositionspfade

12.4.2 Erzeugung von Lebensmitteln

12.4.3 Abschätzung der äußeren Exposition

12.4.4 Abschätzung der inneren Exposition

13 Literatur

Anhang A1. Sprachliche Konventionen

A1.1 Gebrauch modaler Hilfsverben

Anhang A2. Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten

A2.1 Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung  $g_{b,r,eff}$  ( $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ) und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung

A2.2 Inhalationsdosiskoeffizienten  $g_{h,r,eff}$  ( $Sv \cdot Bq^{-1}$ ) und Ingestionsdosiskoeffizienten  $g_{g,r,eff}$  ( $Sv \cdot Bq^{-1}$ )

Anhang A3. Daten zur Berechnung des Radionuklidtransports in der Biosphäre

Anhang A4. Lebensgewohnheiten der repräsentativen Person

Anhang A5. Symbolverzeichnis



## 1 Einleitung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) und die *Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* 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.

### Hinweis:

Zur *Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*: In der vorliegenden Berechnungsgrundlage wird Bezug genommen auf den am 19. Mai 2020 veröffentlichten Entwurf der Bundesregierung vom 06. April 2020, welcher die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV) sowie die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndLSiUntV) beinhaltet.

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 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

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) und in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndLSiUntV) 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 gemittelte zusätzliche jährliche effektive Dosis 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 den 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 für diese Dosisabschätzung vor.

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.

#### H i n w e i s e:

1) Einordnung der Berechnungsgrundlage im Regelwerk:

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde noch nicht abschließend entschieden, an welcher Stelle sich die Berechnungsgrundlage im Regelwerk eingliedern soll. Zwischen BMU, BASE und BfS wurde daher einvernehmlich entschieden, dass die vorliegende Berechnungsgrundlage keine formale Vorgabe erfüllen soll. Daher sind hier auch erklärende Elemente enthalten, welche die Inhalte besser verständlich machen sollen. Dieser Text bildet die Grundlage für weitere fachliche Diskussionen über die Inhalte. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Berechnungsgrundlage in die noch zu bestimmende finale Form überführt werden.

2) Aus Konsistenzgründen sind die Vorgaben zur Biosphärenmodellierung soweit wie möglich an aktuelle Berechnungsvorschriften des Strahlenschutzes angelehnt.

3) Internationale Empfehlungen, wie die der IAEA und der OECD-NEA, wurden bei der Erstellung dieser Berechnungsgrundlage mit berücksichtigt.

4) Diese Berechnungsgrundlage verwendet sprachliche Konventionen zu allgemeinen, nicht-fachlichen Begrifflichkeiten. Diese sind in Anhang A1 dargestellt.



## 2 Anwendungsbereich

### 2.1 Beschreibung des Anwendungsbereichs

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).

Die Berechnungsgrundlage regelt die Einzelheiten der 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.

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

In den repräsentativen vSu ist nach § 7 Absatz 6 Nummer 5 EndlSiUntV keine Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung vorzunehmen.

Die Berechnungsgrundlage gilt nicht für die zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am selben Standort in einem separaten Endlagerbergwerk nach § 21 Absatz 2 EndlSiAnfV.

Die vorliegende Berechnungsgrundlage ist nicht anzuwenden auf den ausgewählten Standort nach § 20 Absatz 2 StandAG im Rahmen des anschließenden Genehmigungsverfahrens nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers. Manche Anforderungen der Berechnungsgrundlage, die sich aus dem Standortauswahlverfahren und der *Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* ergeben, sind für ein atomrechtliches Genehmigungsverfahren nicht zweckmäßig. Die vorliegende Berechnungsgrundlage ist zu gegebener Zeit aufgrund der dann vorliegenden Erfahrungen aus der Anwendung im Standortauswahlverfahren und im Rahmen der mindestens alle zehn Jahre stattfindenden Überprüfung des atomrechtlichen Regelwerks anzupassen.



### 3 Begriffsbestimmungen

1. **Dosisabschätzung:** Analyse, in deren Rahmen für einen Untersuchungsraum die mögliche zusätzliche über die Lebenszeit gemittelte effektive Jahresdosis durch ein potentiell tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle im Bewertungszeitraum für eine repräsentative Person unter Einbeziehung der Ungewissheiten abgeschätzt wird.
2. **Szenario:** 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. Die in der Szenarientwicklung ermittelten Entwicklungen sind synonym als Szenarien zu verstehen.
3. **Szenarientwicklung:** 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.
4. **Szenariengruppe:** Die Aggregation potentieller Entwicklungen zum Zweck der Reduktion der zu betrachtenden Rechenfälle.
5. **Ungewissheit:** Ein Zustand unvollständigen Wissens über ein Phänomen oder einen Sachverhalt, der sich aus einem Mangel an Informationen, nicht auflösbaren Unschärfen oder aus unterschiedlichen Auslegungen zu bereits bekanntem Wissen ergeben kann. Dies führt zu Zweideutigkeiten und Interpretationsspielräumen von Informationen und Modellen im Rahmen der Dosisabschätzung und hat somit Einfluss auf deren Aussagekraft.
6. **Unsicherheit:** Ein Maß an Vertrauen in die Aussagekraft eines Ergebnisses, welches aufgrund von Ungewissheiten einem bestimmten Wertebereich unterworfen ist.
7. **Unsicherheitsanalyse:** Untersucht den aufgrund der Ungewissheiten möglichen Wertebereich der Ergebnisse mit Blick auf sein Ausmaß und seine Grenzen.
8. **Bezugsjahr:** Kalenderjahr innerhalb des Bewertungszeitraums, für das die effektive Dosis der repräsentativen Person berechnet wird.
9. **Referenzperson:** Hypothetische, idealisierte Personen der sechs Altersgruppen der Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV, denen für dosimetrische Zwecke standardisierte Eigenschaften zugeschrieben werden. Die Organdosen der Referenzperson sind die Mittelwerte der entsprechenden Dosiswerte des männlichen und weiblichen Referenzmenschen. Die effektive Dosis der Referenzperson ist die Summe der Organdosen der Referenzperson, die mit den entsprechenden Gewebe-Wichtungsfaktoren gewichtet werden.
10. **Repräsentative Person:** Hypothetische Personen der sechs Altersgruppen der Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV, die aufgrund ihrer Lebensgewohnheiten für höher exponierte Bevölkerungsgruppen in der jeweiligen Altersgruppe repräsentativ sind. Extreme Lebensgewohnheiten werden nicht berücksichtigt.





## 4 Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis

### 4.1 Ziele

- (1) Die Berechnungsgrundlage schafft für die weiterentwickelten und umfassenden vSu gemäß StandAG einen einheitlichen Rahmen sowie Vorgaben 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 und nachvollziehbaren 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 abgeschätzte Dosis in allen Sicherheitsuntersuchungen einer Phase des Standortauswahlverfahrens von ähnlicher Qualität ist. Zudem bezwecken die Regelungen ein übergreifend organisiertes und systematisches Vorgehen, in welchem die für die Dosisabschätzung sensitiven Parameter sowie die relevanten Faktoren und Prozesse identifiziert und berücksichtigt werden.

### 4.2 Grundsätze

- (1) Der Vorhabenträger nach § 3 StandAG hat die Einhaltung der Regelungen dieser Berechnungsgrundlage zu gewährleisten.

#### Hinweis:

Die Formulierung von (1) ist abhängig von der endgültigen Rechtsform der Berechnungsgrundlage. Eine andere Möglichkeit ist beispielsweise „Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung prüft die Berichte und Ergebnisse zur Dosisabschätzung auf Grundlage der Regelungen dieser Berechnungsgrundlage“.

- (2) Die Geosphärenmodellierung hat den Zweck, die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen und den Transport bis in die Biosphäre numerisch zu berechnen. Die Ergebnisse sind zu verwenden, um die Schnittstellen Geosphärenmodellierung – Biosphärenmodellierung zu identifizieren.
- (3) Die Biosphärenmodellierung hat den Zweck, Radionuklidausträge aus der Geosphärenmodellierung in Abschätzungen der zusätzlichen Exposition der Bevölkerung zu überführen.
- (4) Gemäß § 26 Absatz 2 Nummer 1 StandAG muss „[...] im Hinblick auf den Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt sichergestellt werden, dass Expositionen aufgrund von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind.“. Mit der Forderung nach nur geringfügigen zusätzlichen Strahlenexpositionen des Menschen ist auch der Schutz der belebten Umwelt des Menschen hinreichend gewährleistet.
- (5) Bei der Dosisabschätzung darf es keine räumliche Unstetigkeit in den Biosphären- und Geosphärenmodellen sowie in deren Schnittstellen geben. Es ist sicherzustellen, dass der Radionuklidtransport vom Ort der Einlagerung bis zur Exposition des Menschen keine logischen Lücken hat.



(6) 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.

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

(8) 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. Die nach § 3 Absatz 2 EndlSiAnfV ermittelten relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am möglichen Endlagerstandort bilden hierbei die Grundlage für die Dosisabschätzung.

Bei der Dosisabschätzung handelt es sich nicht um eine Prognose und es werden auf ihrer Grundlage keine zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosen für zukünftig tatsächlich lebende Personen berechnet. Die abgeschätzte Dosis wird als ein Indikator für die Sicherheit eines Endlagers verwendet.

(9) Der radioaktive Zerfall der Radionuklide und der Aufbau von Tochternukliden sind zu berücksichtigen. Bei Zerfallsreihen darf die Verringerung der Aktivität langlebiger Radionuklide während kurz andauernder Transportprozesse vernachlässigt werden, sofern dem Aufbau von Tochternukliden Rechnung getragen wird. Zu den Fällen, in denen Radionuklide unberücksichtigt bleiben dürfen, wird auf Kapitel 9 verwiesen.

(10) Die für die Dosisabschätzung zu betrachtende Geosphäre und die Biosphäre unterscheiden sich grundlegend in Bezug auf die Dynamik ihrer Veränderlichkeit. Dadurch unterscheiden sich auch die Möglichkeiten ihrer Abbildung in Modellen zur Dosisabschätzung. Als Konsequenz daraus macht die Berechnungsgrundlage jeweils spezifische Vorgaben für die Geo- und für die Biosphärenmodellierung sowie für die Schnittstellen zwischen beiden Sphären in den Modellen.

#### Hinweis:

Bio- und Geosphäre können sich überlappen. Für die Schnittmengen wird der jeweilige Geltungsbereich von Anforderungen direkt benannt. Eine definitionstreue Abgrenzung zwischen Bio- und Geosphäre ist damit nicht notwendig.

(11) Modelle zur Beschreibung der Prozesse in der Geosphäre sind soweit wie möglich unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen sowie auch biologischen Gesetzmäßigkeiten und Prozesse zu entwickeln. Hierfür legt die Berechnungsgrundlage größtenteils Randbedingungen, Vorgehensweisen, Methoden und Begriffe fest, welche qualitative und inhaltliche Ansprüche an die Modelle definieren.

(12) 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, der in seiner genauen Ausprägung schwer zu prognostizieren ist. 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 der betrachteten Zeit erhöht. Die Berechnungsgrundlage beruht daher sowohl auf wissenschaftlichen Grundlagen als auch auf Konventionen dafür, in welcher Art und Weise die Exposition von Einzelpersonen der



Bevölkerung abzuschätzen ist. Deswegen werden stilisierte Annahmen getroffen, beispielsweise über zukünftige Lebens- und Wirtschaftsweisen der Bevölkerung.

Weiterhin legt die Berechnungsgrundlage Vorgaben für ein konkretes Biosphärenmodell fest. Dies kann jedoch nicht für alle relevanten Entwicklungen und möglichen lokalen Gegebenheiten vollständig sein. Falls notwendig ist es daher zu erweitern und anzupassen.

(13) Im Standortauswahlverfahren ist es zu vermeiden, dass Untersuchungsräume aus nicht gerechtfertigten Gründen aus dem Verfahren ausscheiden. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn nur aufgrund konservativer Annahmen zusätzliche Expositionen abgeschätzt werden, welche zu einer Überschreitung der in § 7 Absatz 2 EndlSiAnfV festgelegten Grenzwerte führen. Um dies zu vermeiden gilt für die Dosisabschätzung 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 gelten bei der Abschätzung möglicher Expositionen folgende Grundsätze:

- Ungewissheiten der Modelle und Daten sind nach den Vorgaben in Kapitel 8 zu analysieren und darzustellen. Diese Vorgaben beinhalten konzeptionelle Unterschiede für die Geo- und die Biosphärenmodellierung.
- Für die Geosphärenmodellierung sind die numerischen Modellierungen auf Basis wissenschaftlicher Grundlagen und realitätsnaher Annahmen durchzuführen. Die Geosphäre ist in diesem Rahmen bis zur Erdoberfläche zu betrachten. In Bereichen, für welche die konkreten Vorgaben zur Biosphärenmodellierung dieser Berechnungsgrundlage gelten, sind die der Biosphärenmodellierung anzuwenden.
- Für die Biosphärenmodellierung sind natürliche Prozesse auf Basis wissenschaftlicher Grundlagen und realitätsnaher Annahmen abzubilden. In Bezug auf den Menschen und seine Handlungen werden stilisierte, aus heutiger Sicht plausible Annahmen getroffen. Zur Vereinfachung dürfen darüber hinaus abdeckende Annahmen getroffen werden. Daraus entstehende Überschätzungen der Exposition sind jedoch zu vermeiden.

(14) 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

(15) Insofern Prozesse und Endlagerkomponenten in der Zukunft betrachtet werden, für die sich mit dem jeweiligen Kenntnisstand keine belastbaren Aussagen treffen lassen, insbesondere bezüglich der Veränderlichkeit relevanter oberflächennaher Bereiche im Untersuchungsraum, sind innerhalb der jeweils betrachteten Entwicklung plausible Annahmen zu treffen. Dies schließt generische oder stilisierte Modelle nicht zwangsweise aus.

#### H i n w e i s:

Eine alternative Vorgehensweise zur Dosisabschätzung mittels Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen wäre beispielsweise, wenn die Einhaltung der Dosisgrenzwerte im Bewertungszeitraum mit konservativen (im ingenieurtechnischen Verständnis) Herangehensweisen abgeschätzt würde. Die vorliegende Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung wird unter den Rahmenbedingungen des Standortauswahlverfahrens angewendet. Zum einen gibt die EndlSiAnfV vor, dass die Modellierungen zum Verhalten des Endlagersystems auf Grundlage realitätsnaher Annahmen



durchzuführen sind (§ 9 Absatz 2 EndlSiUntV). Zum anderen findet im Standortauswahlverfahren eine sukzessive Einengung von mehreren potentiellen Untersuchungsräumen auf einige wenige statt, bis der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit durch Bundesgesetz beschlossen wird. In diesem Anwendungsbereich sind sowohl Unter- als auch Überschätzungen (dies beinhaltet konservative Ansätze) der Dosis nicht vorgesehen.

(16) Im Rahmen der Dosisabschätzung verwendete Informationen, Annahmen und Vorgehensweisen müssen untereinander sowie auch in Bezug auf alle anderen Analysen und Betrachtungen innerhalb der jeweiligen vSu konsistent sein. Bezüglich verwendeter Begrifflichkeiten ist Konsistenz anzustreben, um Missverständnisse zu reduzieren. Dadurch möglicherweise auftretende, nicht auflösbare Widersprüche sind explizit auszuweisen. Innerhalb der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist Konsistenz in Bezug auf folgende Betrachtungen und Analysen besonders relevant:

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

#### Hinweise:

1. „Konsistenz“ ist im Sinne von „Widerspruchsfreiheit“ zu verstehen und nicht gleichzusetzen mit „Deckungsgleichheit“. Da unterschiedliche Modelle für die Beantwortung verschiedener Fragestellung optimiert sind, kann es je nach Fragestellung unvermeidbar sein, dass die numerische Beschreibung zwischen unabhängigen Modellen in der Methodik und in den Zahlenwerten voneinander abweicht.
2. Die Anforderungen der Berechnungsgrundlage sind unabhängig vom Konzept eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG). Modelle, die zur Dosisabschätzung verwendet werden, dürfen folglich ohne Berücksichtigung der in den Sicherheitsuntersuchungen standortspezifisch auszuweisenden Planungsgröße „einschlusswirksamer Gebirgsbereich“ entwickelt werden. Dieses Vorgehen erlaubt, dass die Anforderungen der Berechnungsgrundlage für alle grundsätzlich möglichen Wirtsgesteine identisch sind. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass dadurch nicht die Möglichkeit genommen wird, mögliche Erkenntnisse zu nutzen, die sich aus den Analysen zur Dosisabschätzung und denen zum sicheren Einschluss nach § 4 Absatz 4 EndlSiAnfV ergeben können.

(17) 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.

(18) Die Berechnungsgrundlage ist standortunabhängig konzipiert. Sie enthält keine konkreten unterschiedlichen Vorgaben für die Dosisabschätzung in den weiterentwickelten und umfassenden



vSu. Aus dem unterschiedlichen Informationsstand in den beiden Phasen resultieren jedoch unterschiedliche Erwartungshaltungen an die fachliche Tiefe der Dosisabschätzungen. Dies führt in Anlehnung an § 4 Absatz 1 EndlSiUntV zu folgender Festlegung: Etwaige Einschränkungen aufgrund des Kenntnisstands sind zu analysieren und nachvollziehbar zu begründen. Mögliche Auswirkungen auf die zu berechnenden Dosiswerte durch solche Einschränkungen sind in ihrer Tendenz und in ihrem Ausmaß abzuschätzen und begründet darzustellen. In jedem Fall müssen jedoch eine Modellierung auf realitätsnahen Annahmen basierend umgesetzt werden.

(19) Das für das Endlager vorgesehene Radionuklidinventar ist der Ausgangspunkt jeder Dosisabschätzung und darüber hinaus für alle Untersuchungsräume gleich. Geringfügige Unterschiede können jedoch auftreten, falls bei einem Untersuchungsraum die Einbringung geringer Volumina schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gemäß § 21 Absatz 3 EndlSiAnfV vorgesehen wird und bei einem anderen nicht. Die Beschreibung und Konzeptualisierung des gesamten Radionuklidinventars hinsichtlich Art, Menge und Eigenschaften und die in Verbindung mit den Entwicklungen des Endlagersystems mögliche Mobilisierung aus der ursprünglichen Einlagerungsform sind umfassend und sorgfältig zu analysieren und darzustellen.

(20) 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 weiterhin eingehalten werden. Ein abweichendes Vorgehen ist unter Darstellung der Vor- und Nachteile gegenüber dem Vorgehen nach den Regelungen der Berechnungsgrundlage zu begründen.

(21) Die Nachvollziehbarkeit und Prüfbarkeit der Dosisabschätzung erfordert eine sinnvoll konzipierte und systematische Dokumentation aller verwendeten Unterlagen inklusive Informationen über Zwischenschritte und 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. Die Verwendung von Ergebnissen oder Teilen anderer Arbeiten im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalysen ist zulässig. In solchen Fällen ist eindeutig 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 Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung infolge möglicher Austragungen von Radionukliden durch die Aufsichtsbehörde gewährleistet sind.

#### Hinweis:

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) Initial ist eine Strategie zur Durchführung der Dosisabschätzung zu entwickeln und darzulegen. In Phase 3 ist sie fortzuführen und gegebenenfalls zu korrigieren. Die Strategie dient dazu, das Vorgehen bei der Dosisabschätzung darauf auszurichten, dass mittels eines einheitlichen Vorgehens folgende Ziele erreicht werden:

- a. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist die Dosisabschätzung auf Basis eines nachvollziehbaren Vorgehens so auszurichten, dass qualitativ ähnliche Ergebnisse für alle Untersuchungsräume erreicht werden.
- b. Für die Abschätzung der Dosis ist eine Struktur zu schaffen, welche 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, beschreibt.

(2) Es ist entweder ist eine Strategie zu entwickeln, die in allen vSu der jeweiligen Phase angewendet wird, oder es sind mehrere Strategien zu entwickeln, 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.

(3) Prinzipien, Schlüsselemente und Inhalte einer Strategie sind insbesondere:

- a. Festlegung von und Einbezug der bekannten Informationen für die Modellierung,
- b. Umgang mit räumlichen, zeitlichen und fachlichen Aspekten mit Relevanz für die Dosisabschätzung,
- c. Umgang mit in der Realität gekoppelten Prozessen,
- d. Verwendung von Kopplungen in den Modellen,
- e. Umgang mit Fortschritten des Stands von Wissenschaft und Technik (Mechanismen- und Prozessverständnis, Modellierungsansätze, Berechnungsmodelle, etc.),
- f. Einbindung und Rolle von verbal-argumentativen Erläuterungen und Elementen,
- g. Ausreichende Berücksichtigung aller relevanten Aspekte (Mechanismen, Prozesse, Komponenten, etc.),
- h. Optimierungsprozesse und Abschneidekriterien,
- i. Umgang mit Ungewissheiten und Fehlern,
- j. Sicherung der Qualität von Eingangsdaten und verwendeten Datenbanken sowie der Arbeitsschritte und der Ergebnisse (inklusive Reproduzierbarkeit) und
- k. Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse.



## 6 Systematik und Typen von Modellen

(1) Zur Strukturierung des Vorgehens und der Modelle sind im Rahmen der Dosisabschätzung grundlegende Typen von Modellen in Anlehnung an IAEA (2012) SSG-23 (Kapitel 5.47) zu differenzieren. Die Modelle sind in drei Typen zu unterteilen, die nachfolgend unter den Punkten a. bis c. beschrieben werden :

### a. Konzeptuelles Modell

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

Konzeptuelle Modelle existieren auf verschiedenen Ebenen und der konkrete Inhalt eines konzeptuellen Modells ist fallabhängig. Die Aufgabe jedes konzeptuellen Modells und das angestrebte Ergebnis sind daher immer anzugeben. Je nach Aufgabe sind mindestens die jeweils zutreffenden der im Folgenden aufgezählten wesentlichen zu beschreibenden Aspekte zu identifizieren und darzustellen:

- Systemgrenzen des Modells
  - räumliche Ausweisung des Berechnungsgebiets
  - betrachteter Zeitraum (ggf. unterschiedlich für verschiedene Prozesse, Startzeitpunkte)
  - Ausweisung des zulässigen Anwendungsbereichs
- Modellrandbedingungen
- Räumliche Auflösung des Berechnungsgebiets (z. B. Homogenbereiche)
- Übergabe von Daten und Ungewissheiten an Schnittstellen und Kopplungen zwischen Teilmodellen
- Konzept zum Abgleich der Teilmodelle (Iteration, Kriterien zum Abbruch etc.).

### b. Mathematisches Modell

Mathematische Modelle beschreiben konzeptuelle Modelle anhand mathematischer Gleichungen. Neben den notwendigen Gleichungen umfassen sie alle erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen sowie die numerische Festlegung der verwendeten Parameter der Modelle inklusive ihrer Bandbreiten.

### c. Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell beinhaltet die Hardware und Software, die zur Lösung des mathematischen Modells, meist mit Hilfe numerischer Verfahren, verwendet wird. Dies 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. Verwendete Software hat eine Versionsnummer zur eindeutigen Identifikation und eine zugehörige Dokumentation, die beide angegeben werden müssen. Ergebnisse von numerischen Berechnungsmodellen sind auf ihre Plausibilität zu prüfen und das Prüfergebnis ist darzustellen.



Jedes in einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung angewendete Modell ist einem der genannten Modelltypen zuzuordnen und in seinen Details jeweils inhaltlich zu begründen und nachvollziehbar zu beschreiben.





## 7 Potentielle Entwicklungen des Endlagers

(1) Die Berechnungsgrundlage basiert darauf, dass die Methodik der Szenarienentwicklung unter Berücksichtigung der grundlegenden Empfehlungen von insbesondere IAEA SSG-23, IAEA SSG-14, sowie OECD-NEA 2015 angewendet wird. Sollte bei der Ermittlung und Beschreibung der Entwicklungen nicht die Methode der Szenarienentwicklung angewendet werden, dann sind die Vorgaben der Berechnungsgrundlage sinngemäß anzuwenden. Grundlage für die Szenarienentwicklung sind die Vorgaben in § 3 EndlSiAnfV (Bewertungszeitraum; Entwicklungen des Endlagersystems) für die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen.

(2) Die Szenarienentwicklung 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 Szenarienentwicklung ist der Dosisabschätzung verfahrenstechnisch voranzustellen.

### Hinweis:

Auch wenn die Szenarienentwicklung rein logisch den Modellierungen der Dosisabschätzung vorangestellt werden muss, ist ein frühzeitiger Austausch zwischen den verschiedenen an der Erarbeitung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen Beteiligten ratsam für eine effiziente Realisierung der Dosisabschätzung.

(3) Die Szenarienentwicklung ermittelt und beschreibt unter systematischer Betrachtung der Sicherheitsfunktionen und im Abgleich mit einem FEP-Katalog (aus dem Englischen *features, events and processes*; z.B. jeweils aktueller FEP Katalog der OECD-NEA) mit einer plausiblen und nachvollziehbaren Methodik die für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems insbesondere hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation im Untersuchungsraum sowie der Barrieren und der einzulagernden Abfälle und ordnet diese nach § 3 Absatz 2 EndlSiAnfV ein.

(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 den potentiellen Austrag von Radionukliden aus dem Endlager umfassend sind.

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

(6) Wenn auf Basis fachlicher Analysen plausibel begründet werden kann, dass die zusätzliche Exposition aufgrund einer Entwicklung nicht relevant für die Langzeitsicherheit des Endlagers ist oder, dass diese Entwicklung zu einer niedrigeren Exposition als eine andere Entwicklung führt, muss die Dosisabschätzung für diese Entwicklung nicht explizit numerisch erfolgen.



## 8 Umgang mit Ungewissheiten

### 8.1 Allgemeines

- (1) Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist gemäß § 11 EndSiUntV eine Bewertung der Ungewissheiten im Bewertungszeitraum vorzunehmen, was die Dosisabschätzung mit einschließt.
- (2) Die Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten bei der Dosisabschätzung werden in der Berechnungsgrundlage konkretisiert.
- (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.

#### Hinweis:

Ungewissheiten resultieren beispielsweise aus Wissens- und Verständnislücken, nicht bekannten oder nicht berücksichtigten Phänomenen, widersprüchlichen Expertenmeinungen, Daten unbekannter Herkunft, zufälligen und systematischen Messabweichungen, fehlenden Daten oder fehlenden Meta-Daten, fehlerhaften Angaben in bzw. Übertragungsfehlern aus der Literatur, Skaleneffekten, numerischen Ungenauigkeiten oder der Anwendung von Methoden außerhalb ihres Anwendungsbereiches. Sie können somit in allen Teilen der Dosisabschätzung auftreten.

### 8.2 Übergeordnete Vorgaben

- (1) Die Anforderungen an die Betrachtung von Ungewissheiten sind auf alle in den Kapiteln 9 bis 12 behandelten Bereiche anzuwenden. Die abweichenden Vorgaben für die Biosphärenmodellierung sind in Kapitel 8.5 beschrieben.
- (2) Die nach Kapitel 4 zu erstellende Strategie umfasst auch den Umgang mit den Ungewissheiten für die Dosisabschätzung. Die Strategie behandelt mindestens die in Kapitel 8.3 genannten Aspekte und legt insbesondere einheitliche Bewertungsmaßstäbe für die Aussagekraft der Daten und Modelle fest. Dies schließt die Bewertungsmaßstäbe für die notwendigen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen nach Kapitel 8.4 mit ein. Weiterhin behandelt die Strategie die Minimierung der Ungewissheiten bei der Dosisabschätzung und Abbruchskriterien für weitere Minimierungsbestrebungen.

#### Hinweis:

Die Strategie befasst sich mit Ungewissheiten, um das Ziel, qualitativ ähnliche Ergebnisse bei der Abschätzung und Beschreibung der Ungewissheiten und damit vergleichbare Ergebnisse der Dosisabschätzung für alle potentiellen Endlagerstandorte, erreichen zu können.

- (3) Zusammenhänge zwischen Modellparametern, Modellannahmen und Modellstrukturen sind bei der Betrachtung der Ungewissheiten zu berücksichtigen. Fehler, die mit möglichen Kopplungen von Berechnungsmodellen verbunden sind, sind soweit wie möglich zu quantifizieren.
- (4) Bei der Durchführung von Dosisabschätzungen im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bestehen keine Unterschiede im Umgang mit Ungewissheiten für verschiedene Endlagersysteme und Untersuchungsräume.



### 8.3 Spezifische Vorgaben

#### 8.3.1 Informationsquellen

(1) Die zur Abschätzung der Dosis herangezogenen Informationen gemäß Kapitel 8.2 sind mit den zugehörigen Ungewissheiten vollständig und nachvollziehbar darzustellen. Für jeden Untersuchungsraum ist eine Liste mit den verwendeten Informationsquellen zu führen, die Qualität der einzelnen Quellen zu bewerten und zu dokumentieren.

##### Hinweis:

Mögliche Quellen für Informationen sind beispielsweise Felddaten, Laborversuche, Inventardaten, Demonstrationsexperimente, Literaturdaten, Experteneinschätzungen, Ergebnisse aus vorausgehenden Modellrechnungen, verarbeitete Rohdaten sowie generell der aktuelle Kenntnisstand zum potentiellen Endlager im Untersuchungsraum.

#### 8.3.2 Qualität der Daten und Komplexität 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 Experten.

(2) Die verwendeten Informationen und die zugehörigen Ungewissheiten sind, soweit möglich, gemäß ihrem Grad an subjektiver Einschätzung einzuordnen. Damit sollen Experteneinschätzungen aufgrund von Unterschieden bezüglich Erfahrung und Wissen transparent gemacht werden.

(3) Die Komplexität der verwendeten Modellansätze muss 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 Experteneinschätzungen 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.

#### 8.3.3 Nicht-Wissen und Fehler

(1) Fehler bei der Planung, Durchführung, Auswertung und Verbesserung der Untersuchungen können auf allen Ebenen auftreten und nie vollständig ausgeschlossen werden. Weiterhin ist der Informationsstand zu den Untersuchungen immer als unvollständig und auch von Nicht-Wissen geprägt anzusehen. Zur Vermeidung und Minimierung von solchen Fehlern und der Förderung des bewussten Umgangs mit Nicht-Wissen sind daher im Rahmen der Dosisabschätzung qualitätssichernde Maßnahmen vorzusehen und im Managementsystem festzulegen, die ein Höchstmaß an Vertrauen in die Qualität der Berechnungen sowie in die Belastbarkeit aller Annahmen und die Einhaltung aller bestehenden Grenzwerte, Richtwerte und Kriterien schaffen. Dabei ist die Identifizierung, Überprüfung und Weiterentwicklung dieser qualitätssichernden Maßnahmen als prioritär anzusehen.



### Hinweis:

Mögliche Maßnahmen zur Minimierung von Fehlern sind beispielsweise Validierung und Verifizierung von Modellen, Konvergenzprüfungen, Auflistung von Modellannahmen, Benchmark-Rechnungen inklusive Modellierer-Vergleiche, übergeordnete Überprüfungen der Kapazität und Strategie verschiedener Modellierer-Teams, Abgleich mit FEP-Listen, externe Reviews, Dokumentation von Expertenbefragungen, Verwendung von Formularen und Schaffung automatisierter Abläufe, Befragung von Personal, systematische Auflistung von Fehlerquellen, Analyse von Ausreißern und fehlenden Daten, Nachmessungen, Analyse der Abhängigkeit zwischen Daten, formalisierte Datenfreigaben oder unabhängige Kontrolle von Eingangsdateien.

- (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.

### 8.3.4 Plausibilität von Informationen

- (1) Für alle verwendeten Daten ist jeweils ein plausibler Bereich abzugrenzen. Die Abgrenzung ist zu begründen und mit Blick auf die Dosisabschätzung zu bewerten.
- (2) Der plausible Bereich ist, soweit aufgrund des Kenntnisstands gerechtfertigt und soweit aufgrund der Sensitivität auf die berechneten Dosiswerte erforderlich, weiter in Bereiche mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zu unterteilen. Die Zuweisung von diskreten Wahrscheinlichkeiten für Teile des plausiblen Bereichs bzw. die Auswahl von kontinuierlichen Verteilungsfunktionen über den plausiblen Bereich ist auf die Informationsgrundlage und auf die Anforderungen von in der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse gemäß Kapitel 8.4 verwendeten statistischen Methoden abzustimmen.

### 8.3.5 Berücksichtigung von Abhängigkeiten

- (1) Soweit möglich und soweit bezüglich der Sensitivität auf die berechneten Dosiswerte erforderlich, sind voneinander abhängige Informationen 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.

### Hinweis:

Insbesondere dürfen bei der Modellierung der Ungewissheiten keine unlogischen oder physikalisch unmöglichen Situationen in die Berechnungen Eingang finden.

### 8.3.6 Aggregation und Übertragung

- (1) Die Aggregation von Informationen und zugehörigen Ungewissheiten aus verschiedenen Quellen ist konsistent durchzuführen und nachvollziehbar darzustellen. In ihrer Auswirkung relevante, unterschiedliche Gewichtungen herangezogener Informationen sind zu begründen.



(2) Durch die Aggregation entstehende zusätzliche Ungewissheiten sind auszuweisen und bei der Dosisabschätzung zu berücksichtigen. Hierzu können neben formalen Methoden (beispielsweise Bayessche Statistik) auch Experteneinschätzungen 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 Informationen in die Zukunft und die Skalierung zwischen Labor- und Feldmaßstab. Durch die Übertragung entstehende zusätzliche Ungewissheiten sind auszuweisen und bei der Dosisabschätzung zu berücksichtigen.

## 8.4 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

(1) Mit Hilfe von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen werden die Ungewissheiten auf ihre Reduzierbarkeit und ihre wechselseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen rechnerisch untersucht. Hierfür sind die aus der Szenarienanalyse abgeleiteten und in Kapitel 7 verwendeten zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen heranzuziehen.

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

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

(3) In allen statistischen Analysen ist eine statistische Sicherheit in Abhängigkeit des Kenntnisstandes festzulegen.

(4) Die Unsicherheitsanalysen weisen die Bandbreite und die Verteilung der jeweils berechneten Dosis aus. Die zugehörigen Sensitivitätsanalysen bewerten den Einfluss einzelner Parameter mit dem Ziel, Erkenntnisse für die Verbesserung der Aussagekraft der Dosisabschätzung zu erhalten. Dies impliziert ein iteratives Vorgehen zur ihrer Ermittlung. Die einzelnen Iterationsschritte müssen nicht im Detail dargestellt werden, es ist jedoch auf die abschließende Konsistenz aller Ergebnisse zu achten und der Erkenntnisgewinn auszuweisen.

(5) Zur Ermittlung und Darstellung der Unsicherheiten bezüglich der berechneten Dosis sind deterministische und probabilistische Berechnungen komplementär zueinander durchzuführen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus Vorüberlegungen zur Erstellung der Strategie aus Kapitel 8.2 ergeben oder daraus abgeleitet werden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.

(6) Zur Beurteilung der Sensitivität der abgeschätzten Dosis auf die herangezogenen numerischen Informationen sind grafische und quantitative Methoden komplementär anzuwenden. Es sind sowohl die lokale Sensitivität zum Erwartungswert der deterministischen Analyse als auch die globale Sensitivität von verwendeten Informationen zu ermitteln. Der Begriff global bezieht sich



dabei auf den insgesamt plausiblen Bereich der herangezogenen Informationen, der Begriff lokal auf einen konkreten Ort in diesem Bereich.

## 8.5 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. 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. Wegen diesen weitgehenden Festlegungen sind Betrachtungen zu Ungewissheiten und Unsicherheiten weder erforderlich noch zielführend. Im Zuge der Erstellung der Biosphärenmodellierung wurde bereits umfassend geprüft, dass durch die Wahl der Modellstrukturen, der Modellparameter und der Modellannahmen keine Unterschätzung der 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 anzupassen. Für die klimaabhängigen Modellparameter sowie für die Parameter von Modellen, die der Vorhabenträger 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 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. Falls Modellparameter explizit vorgegeben sind, erübrigen sich Parameter-Sensitivitätsanalysen.

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



## 9 Radionuklidinventar und Auswahlprozess

Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen sind gemäß § 27 Absatz 3 StandAG 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 zu berücksichtigen. Dies beinhaltet auch das Radionuklidinventar aus vergleichsweise geringen Volumina schwach- und mittelfradioaktiver Abfälle gemäß § 21 Absatz 3 EndlSiAnfV, falls die Einlagerung solcher Abfälle in Betracht gezogen wird. Für die Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung ist das Abfallinventar vollständig radionuklidspezifisch zu spezifizieren und unter Angabe sämtlicher hierfür verwendeter Informationsquellen in geeigneter Weise nachvollziehbar zu dokumentieren. Die Beschreibung des Radionuklidinventars muss so gestaltet werden, dass sich durch eventuelle Informationsdefizite und Festlegungen keine systematischen Bevorzugungen oder Benachteiligungen für einzelne Untersuchungsräume ergeben.

Für die Kontamination der Biosphäre und die daraus resultierende 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.

### Hinweis:

Die Berechnungsgrundlage unterscheidet zwischen (I) Radionuklidinventar, welches nur die Radionuklide im und aus dem Abfallinventar umfasst, und (II) Abfallinventar, welches alle Radionuklide sowie auch nicht radioaktive Stoffe umfasst, die den Abfällen zugerechnet werden. Ein Beispiel für Stoffe, die bei solchen Bewertungen mit in Betracht gezogen werden müssen, ist die Borosilikatglas-Matrix von verfestigten, ehemals flüssigen hochradioaktiven Abfällen.

Informationen über das Radionuklidinventar werden gemäß der Verordnung nach § 38 StandAG vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung gespeichert. Die beim Vorhabenträger zum Zwecke der Dosisabschätzung verwendeten und zusätzlich gesammelten Informationen über das Radionuklidinventar müssen als identischer Datensatz an das BASE übermittelt werden.

Zur Durchführung der Modellierungen für die Dosisabschätzung darf die Auswahl der zu berücksichtigenden Radionuklide 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 Exposition der repräsentativen Person vernachlässigt werden dürfen. Hierbei ist zu beachten, dass kurzlebige Radionuklide durch ein langlebiges Mutternuklid nachgebildet werden können. 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.



Die formulierten Anforderungen an die Auswahl der relevanten Radionuklide für die Durchführung der Dosisabschätzung sind nicht allein maßgebend für die Betrachtung des Abfallinventars für die Dosisabschätzung. Darüber hinausgehende Anforderungen ergeben sich aus der Berechnungsgrundlage insbesondere durch die Anforderung, Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen durchzuführen. Beispielsweise können nicht radioaktive Nuklide und Verbindungen aus dem Abfallinventar vorliegen, welche die Mobilität und den Transport der Radionuklide beeinflussen. Solche nicht radioaktiven Stoffe und Verbindungen sind zu identifizieren und zu berücksichtigen. Identifikation von, Umgang mit und Implementierung in die Modellierungen von solchen Stoffen sind darzustellen und zu begründen.





## 10 Geosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung

### 10.1 Übergeordnete Aspekte der Geosphärenmodellierung

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.

Der Geosphärenmodellierung liegen die Geosynthese, die geowissenschaftliche Langzeitprognose sowie die Szenarienentwicklung 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.

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.

Um in den numerisch zu betrachtenden komplexen Systemen alle relevanten Einflüsse berücksichtigen und dazu adäquate statistische Verfahren zur Bewertung der Ungewissheiten anwenden zu können, dürfen verwendete Berechnungsmodelle gegenüber dem technisch maximal Machbaren vereinfacht werden, solange sie immer noch der sachgerechten Beantwortung der jeweiligen Fragestellung dienen und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

#### Hinweis:

Numerische Modellierungen stellen immer eine Vereinfachung der realen Situation dar, auch wenn sie auf Grundlage realitätsnaher Annahmen durchgeführt werden. Bei der Durchführung numerischer Analysen zur Abschätzung der Dosis bei einem Endlager bestehen häufig Zielkonflikte zwischen dem Anspruch, das Verhalten der Radionuklide im Endlagersystem möglichst korrekt innerhalb der jeweils betrachteten Entwicklung zu beschreiben und der Vereinfachung der Berechnungsmodelle. Die Vereinfachung von Modellen bezieht sich insbesondere auf räumliche Aspekte, das Weglassen oder Stilisieren von Prozessen und die Reduktion komplexer Zusammenhänge (z.B. nicht-linearer Beziehungen) auf einfache Beziehungen.

Bei der Vereinfachung von Berechnungsmodellen sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Alle Vereinfachungen müssen nachvollziehbar begründet und ihre Auswirkungen beschrieben werden, wenn möglich quantitativ.
- Analytisch oder technisch anspruchsvollere Modelle, die aufgrund von Zielkonflikten nicht implementiert werden können oder sollen, sind bei der Begründung der Vereinfachung zu berücksichtigen.
- Falls vereinfachte Betrachtungen mehrere Prozesse oder Komponenten des Endlagersystems im Modell untrennbar miteinander verbinden, ist darauf zu achten, dass es nicht zu einer mehrfachen Berücksichtigung oder dem Ausschluss von Prozessen oder Komponenten kommt.
- Im Ergebnis darf die Vereinfachung nicht zu einer niedrigeren Dosis führen.



## 10.2 Modellbildung

Die drei Typen von Modellen (Kapitel 6) liefern die Ausgangsbasis für die Modellbildung, die in diesem Kapitel beschrieben wird und folgende Elemente einführt:

- Quellterm und Darstellung möglicher Radionuklidaustragungen (Kapitel 10.2.2),
- Modelle der Mobilisierung von Radionukliden (Kapitel 10.2.3),
- Modelle des Transports von Radionukliden (Kapitel 10.2.4) und
- Modelle für weitere Prozesse zur Unterstützung der Modelle für Mobilisierung und Transport in der Geosphäre (Kapitel 10.2.5).

Ein wesentlicher Aspekt bei der Modellierung im Rahmen der Dosisabschätzung ist, dass Radionuklide nicht in jeder vorliegenden Form unbegrenzt transportiert werden können. Erst mobilisierte Radionuklide können transportiert werden. 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. Trotz der hier gewählten formalen Unterteilung sind Auswirkungen möglicher tektonischer Hebungs- und Erosionsprozesse mit zu berücksichtigen.

Mathematische Modelle und Berechnungsmodelle sind anzuwenden, um die Mobilisierung und den Radionuklidtransport durch die Geosphäre quantitativ zu beschreiben. Dafür sind Modelle zur Berücksichtigung weiterer Prozesse zu entwickeln oder auszuwählen und anzuwenden, mit deren Hilfe detailliertere Betrachtungen relevanter Reaktionsmechanismen und Prozesse analysiert werden können, die zur Quantifizierung der Mobilisierung und des Transports von Radionukliden sowie beeinflussender Prozesse gebraucht werden.

Die Anzahl der verwendeten Modelle zur Analyse der Mobilisierung und des Transports ist nicht begrenzt. Es ist auch zulässig, ein integrales Modell zu verwenden, welches alle benötigten Elemente umfasst. Somit ist es zulässig, ein oder mehrere konzeptuelle Modelle, ein oder mehrere gekoppelte mathematische Modelle und ein oder mehrere gekoppelte Berechnungsmodelle aufzustellen und zu verwenden.

### 10.2.1 Methodische Grundlagen

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 Szenarienentwicklung, identifiziert. Eine Berücksichtigung im Rahmen der Modellierungen erfordert jedoch die Abstraktion und Übertragung in Modelle. Wesentliche Inhalte der durchzuführenden Analysen sind insbesondere:

#### a. Regionale hydrogeologische Situation

Die regionale hydrogeologische Situation ist zum Zwecke der initialen Abschätzung des notwendigerweise zu betrachtenden Gebiets für die Radionuklidausbreitung sowie zur Ermittlung von Randbedingungen für lokale hydrogeologische Modelle mittels Modellierungen darzustellen.



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 Geosphären-Biosphärenmodellierung (Kapitel 11) im jeweiligen Untersuchungsraum zu berücksichtigen sind.

Das Grundwassermodell ist bei der Bestimmung des geochemischen Milieus zu berücksichtigen, beispielsweise zur Bewertung der Ausbildung von Lösungs-Fällungs-Gleichgewichten relevanter Festphasen und der Relevanz kinetischer Effekte. 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.

#### b. Lokale hydrogeologische Situation

Die Modellierung der lokalen hydrogeologischen Situation ist anzuwenden, um im Bereich erwarteter Radionuklidfahnen im Grundwasser beziehungsweise in der Gasphase eine feinere Diskretisierung umzusetzen sowie Betrachtungen von kleinräumig heterogenen Fließsystemen vorzunehmen und um spezifische Prozesse effizienter zu analysieren.

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

#### c. Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Komponenten des Endlagersystems im Bewertungszeitraum

Im Rahmen der Dosisabschätzung sind, soweit noch nicht anderweitig im Rahmen der jeweiligen vSu erfolgt und im Rahmen der Dosisabschätzung berücksichtigt, relevante physikalische und chemische Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Komponenten des Endlagersystems zu bewerten, beispielsweise zwischen Abfällen und Barrieren, zwischen (geo)technischen Barrieren untereinander oder zwischen (geo)technischen Barrieren sowie anderen eingebrachten Baustoffen und anstehendem Gestein. In diese Analyse sind insbesondere (gebirgs)mechanische Spannungen und das geochemische Milieu miteinzubeziehen.

#### d. Geochemisches Milieu

Das geochemische Milieu bestimmt die Mobilität vieler Radionuklide in der Geosphäre maßgeblich und ist notwendig, um chemisch bedingte Veränderungen der Barrieren sowie Rückkopplungen auf das geochemische Milieu zu bewerten. Aus diesem Grund ist die Bestimmung des geochemischen Milieus im Endlagersystem im Rahmen der Dosisabschätzung vorzunehmen. Sie umfasst 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.

### 10.2.2 Quellterm und Darstellung möglicher Radionuklidaustragungen

Der Quellterm ist als eine Hilfsgröße zu verstehen, die zur Abgrenzung und Vereinfachung von Modellen im Rahmen der Betrachtung der Radionuklidausbreitung verwendet wird und zu dessen Herleitung verschiedene Untersuchungen vorgenommen und Annahmen getroffen werden müssen. Im Ergebnis ist der Quellterm eine mathematische Funktion, die die Freisetzung von radioaktiven Stoffen (z.B. aus Abfallprodukt, Abfallgebinde, Einlagerungskammer, Endlager) beschreibt.



Der Quellterm liefert auf Basis der geowissenschaftlichen Gegebenheiten im jeweiligen Untersuchungsraum sowie unter Verwendung der relevanten Entwicklungen nach §3 (2) EndSiAnfV, des Sicherheitskonzeptes und der Auslegung des Endlagers als Ergebnis Freisetzungsraten für das berücksichtigte Radionuklidinventar aus einem definierten Bereich des Endlagers. Bei der Aufstellung des Quellterms sind die relevanten Ausgangs- und Randbedingungen sowie die beeinflussenden Prozesse in einem konzeptuellen Modell darzustellen. Die so ermittelbaren Radionuklidströme gehen mitsamt den zugehörigen Ungewissheiten als Eingangsgröße in die sich räumlich anschließenden mathematischen Modelle und Berechnungsmodelle ein.

Es ist darzustellen, an welcher Stelle in den Modellen die räumlichen Betrachtungsgrenzen für die Beschreibung eines oder mehrerer Quellterme angesetzt werden.

#### H i n w e i s:

Ein Modellquellterm kann so definiert sein, dass unter Berücksichtigung der bereits mobil vorliegenden Radionuklide zu seiner Ermittlung ausschließlich Modelle zur Mobilisierung von Radionukliden benötigt werden, er kann jedoch auch Modelle zum Transport sowie Modelle für weitere Prozesse umfassen.

Über die Darstellung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung als Gesamtergebnis der Dosisabschätzung hinaus sind die Radionuklidflüsse aus dem Quellterm zu bestimmen. Dafür sind:

1. die Radionuklidströme über den geometrischen Rand des Quellterms oder der Quellterme für die Geosphärenmodellierung,
2. die Radionuklidströme aus den technischen und geotechnischen Barrieren in die geologischen Barrieren sowie
3. die auf Basis der Geosphärenmodellierung berechneten Radionuklidströme in die Schnittstelle Geosphäre-Biosphäre

mitsamt den zugehörigen Ungewissheiten zu ermitteln und darzustellen.

#### H i n w e i s:

Ziel der Darstellung der Radionuklidflüsse an ausgewählten Stellen, welche ausgetragene Radionuklide auf ihrem Transportpfad in der Geosphäre passieren müssen ist es, ein besseres Systemverständnis über den Radionuklidtransport und die Rolle der Barrieren zu vermitteln und die Betrachtungen, in Anlehnung an IAEA (2004), besser nachvollziehbar zu machen.

### 10.2.3 Modelle der Mobilisierung von Radionukliden

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, sodass sie in der Folge die Endlagergebinde verlassen und weiter transportiert werden können. Bereits im intakten Endlagerbehälter liegt ein Teil der Radionuklide in mobiler Form vor und ist direkt nach Eintreten des Behälterversagens transportierbar. Spätestens zum Zeitpunkt des Behälterversagens gilt der Anteil der Radionuklide als mobil, 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 immobilten Teils der Radionuklide ist im gesamten Bewertungszeitraum zu berücksichtigen. Eine konkrete Beschreibung der Prozesse, welche die Mobilisierung initiieren, unterstützen oder behindern, ist vorzunehmen.



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:

- Alteration, Korrosion und Auflösung aller potentiell relevanten Stoffe der Endlagergebinde, welche zu einer Mobilisierung von Radionukliden führen. Dies betrifft unter anderem vorhandene Abfallmatrices (z. B.  $\text{UO}_2$ -Matrix oder Glasmatrix) und aktivierte Materialien
- Bildung von radioaktiven Gasen.

Sobald die Integrität eines Behälters verletzt ist, ist davon auszugehen, dass Fluide ein- und austreten können. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist von einer Korrosion der Hüllrohre und Abfallmatrices auszugehen.

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. Grundsätze der Thermodynamik sowie kinetische Effekte sind zu berücksichtigen, wenn sie das Ergebnis der Dosisabschätzung beeinflussen, wobei insbesondere der pH-Wert und das Redoxmilieu einzubeziehen sind.

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

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.

### 10.2.4 Modelle des Transports von Radionukliden

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.

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. 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.

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



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

Schnittstellen zu und zwischen den Modellen sind auszuweisen und Kopplungen, wo zutreffend, zu berücksichtigen.

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:

- 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.
- Müssen Daten oder Parameter ermittelt werden, welche nicht direkt aus der jeweiligen Entwicklung hervorgehen, sind diese in Einklang mit der jeweiligen Entwicklung herzuleiten.
- Es ist sicherzustellen, dass bei der Berücksichtigung und Implementierung von Prozessen mit retardierender Wirkung auf den Transport von Radionukliden die jeweilige Konfidenz über die Wirksamkeit des jeweiligen Prozesses betrachtet und ausgewiesen wird.

### 10.2.5 Modelle für weitere Prozesse zur Unterstützung der Modelle für Mobilisierung und Transport in der Geosphäre

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.

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

## 10.3 Qualifizierung von Berechnungsmodellen und mathematischen Modellen

Durch die Verifizierung soll überprüft werden, ob das mathematische Modell richtig im Berechnungsmodell implementiert wurde (IAEA 2003, IAEA 2019). Die Verifizierung der verwendeten Berechnungsmodelle ist z. B. durch eigene Berechnungen oder Berechnungen in den jeweiligen



Handbüchern nachzuweisen. 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. Außerdem sollte für das jeweilige Berechnungsmodell die prinzipielle Eignung durch ähnliche Referenzprojekte gezeigt werden, in denen sich das Berechnungsmodell erfolgreich bewährt hat.

Die Validierung von mathematischen Modellen und Berechnungsmodellen dient dazu, zu prüfen, ob das jeweilige Modell das reale unterliegende System adäquat abbildet (IAEA 2003, 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 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 und zugrunde liegenden Aspekte der mathematischen Modelle, wie z.B. zeitliche oder räumliche Diskretisierung, Abbruch- und Konvergenzkriterien.

Im Fall von Aktualisierungen des Betriebssystems, der Berechnungsmodelle oder der mathematischen Modelle sowie Änderungen der Computer-Hardware ist zu zeigen und zu dokumentieren, dass die Verifizierung und Validierung weiterhin gültig sind (in Anlehnung an IAEA 1999, Kapitel 1.3.3).

Wenn unterschiedliche Fragestellungen gekoppelt und dafür ein oder mehrere Berechnungsmodelle verwendet werden, ist nachvollziehbar darzulegen, dass keine Informationen durch die Kopplung verloren gehen, die schlussendlich für das Ergebnis der Dosisabschätzung relevant werden. Wenn dies nicht ausgeschlossen werden kann, sind die Auswirkungen aufzuzeigen und zu begründen, warum das Verfahren trotzdem angewendet werden soll.



## 11 Schnittstelle Geosphärenmodell – Biosphärenmodell für die Dosisabschätzung

Die Schnittstelle Geosphärenmodellierung – Biosphärenmodellierung stellt den modelltechnischen Übergang von der Geosphärenmodellierung zur Biosphärenmodellierung dar und ist auf den jeweiligen Untersuchungsraum und das darin vorgesehene Endlagersystem abzustimmen.

Die Schnittstelle Geosphärenmodellierung – Biosphärenmodellierung 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.

Die Schnittstelle Geosphärenmodellierung-Biosphärenmodellierung 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.

Die Wahl und räumliche Positionierung der Schnittstellen ist zu begründen. Insbesondere, wenn Radionuklide vom Menschen selbst gefördert werden, was beispielsweise 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)).

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.

Generische Annahmen zur Schnittstelle Geosphärenmodell - Biosphärenmodell dürfen nur verwendet werden, wenn sie keine Bevorteilung oder Benachteiligung für einzelne Untersuchungsräume oder Wirtsgesteine bedeuten.

### H i n w e i s:

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. Relevant ist, dass zwischen den Modellen keine räumliche Unstetigkeit und dadurch unrealistische Situation entsteht.





## 12 Biosphärenmodellierung zur Dosisabschätzung

### 12.1 Übergeordnete Aspekte der Biosphärenmodellierung

Für die Auswahl der Radionuklide, die in den Rechenfällen betrachtet werden, sind die Vorgaben in Kapitel 9 anzuwenden. Bei Zerfallsreihen mit einem langlebigen Mutternuklid und kurzlebigen Tochternukliden darf zur Abschätzung der 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 StrlSchV festgelegt werden, falls das langlebige Mutternuklid in dieser Tabelle aufgeführt ist.

**H i n w e i s** zum Abschneidekriterium für kurzlebige Radionuklide:

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.

Die Modelle und Parameter zur Berechnung der Exposition sind so festzulegen, dass bei deren Anwendung die zu erwartende Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung nicht unterschätzt wird. Für die in dieser Berechnungsgrundlage angegebenen Modelle dürfen für kühlgemäßes 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) 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 Körperdosen der repräsentativen Person müssen so realistisch wie mit vertretbarem Aufwand möglich sein. Bei der Berechnung der zu erwartenden Exposition durch die in die Biosphäre gelangten Radionuklide sind bevorzugt spezifische Daten und sonstige Informationen des Untersuchungsraumes anzuwenden. 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.

**H i n w e i s** zu den Quellen der radioökologischen Modelle:

Die Gleichungen in dieser Berechnungsgrundlage beruhen auf den Modellkonzepten, die mit denen in der *Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten)* und den *Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau – BglBb)* identisch oder diesen zumindest sehr ähnlich sind. Die Gleichungen konnten deshalb zum Teil direkt diesen Berechnungsvorschriften entnommen werden (Gleichungen (3)-(11), (13), (15), (16), (20), (21), (23)-(27)). Falls erforderlich, wurden sie im Hinblick auf die Berechnung der Exposition der repräsentativen Person infolge der Austragung von Radionukliden aus einem Endlager angepasst. Nur in wenigen Fällen war eine Neuentwicklung auf Grundlage der oben erwähnten Modellkonzepte notwendig. Gleichung (1) stammt aus dem Bericht GRS-241.



Zusätzlich zur Nutzung von kontaminiertem Grundwasser ist zum Trinken, Tränken und Bewässern auch die Nutzung von Oberflächenwasser zu berücksichtigen. Von den beiden Varianten (Nutzung von Grundwasser, Nutzung von Oberflächenwasser) ist jeweils die ungünstigere für die Abschätzung der Exposition der repräsentativen Person heranzuziehen. Weiterhin ist der Anstieg von oberflächennahem Grundwasser zu berücksichtigen und zu prüfen, ob das Grundwasser durch den Anstieg für die Wurzelaufnahme von Nutzpflanzen verfügbar ist. Außerdem ist der Gastransport von Radionukliden von der Geosphäre bis in die Atmosphäre zu betrachten.

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 langfristig gedeckt werden können. Die Auswahl der für die Dosisabschätzung zur Wassernutzung verwendeten Grundwasserleiter muss den heutigen Maßstäben entsprechen.

Die Biosphärenmodellierung in der vorliegenden Berechnungsgrundlage bezieht sich ausschließlich auf potentielle Endlagerstandorte im Landesinneren und enthält deshalb Berechnungsverfahren zur Abschätzung der 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:

- Eintrag von Radionukliden aus dem Endlager im Küstenbereich oder unter dem Meer in das Meeresgewässer einschließlich der Ausbreitung der Radionuklide im Meeresgewässer.
- Anlagerung von Radionukliden an Schwebstoffe im Meerwasser, Sedimentation kontaminierter Schwebstoffe und Remobilisierung von Radionukliden aus dem marinen Sediment.
- Aufnahme der Radionuklide durch marine Biota, sofern sie für die menschliche Ernährung genutzt werden.
- 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

Die zeitliche Entwicklung 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 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)).



Bei der Biosphärenmodellierung sind stilisierte klimatische Zustände anzuwenden, welche die Bandbreite der potentiellen klimatischen Entwicklungen in einem Untersuchungsraum abdeckend beschreiben. Dies bedeutet, dass zusätzlich zur Berechnung des Radionuklidtransports mit den aktuellen kühlgemäßigten klimatischen Verhältnissen in Deutschland kältere und wärmere klimatische Verhältnisse mit unterschiedlichen Niederschlagsmengen umfassend 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

Für die Dosisabschätzung sind zusätzlich mögliche zukünftige Wechsel zwischen verschiedenen Klimata mitsamt der Übergangsphasen während des Bewertungszeitraums zu berücksichtigen.

Es ist im Bewertungszeitraum auf die Verträglichkeit der landwirtschaftlich erzeugten Pflanzen (Nahrungs- und Futtermittel) mit den klimatischen Bedingungen zu achten. Ebenso ist die durch die Klimaentwicklung bedingte Veränderung der Oberfläche zu berücksichtigen, wie z. B. die Überflutung von Flächen aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs, die Vermoorung oder die Verlandung von Seen.

Beispiel zur Anwendung stilisierter klimatischer Zustände:

Zur Veranschaulichung wird folgendes Beispiel dargestellt, das jedoch keine Vorgaben festlegt, ausschließlich der Illustration dient und nur eine stark reduzierte Analyse der Auswirkungen verschiedener klimatischer Zustände eines Untersuchungsraums darstellt. Die Analyse der potentiellen Klimaentwicklungen aus der Szenarienentwicklung weist für den betrachteten Untersuchungsraum neun Klimata im Bewertungszeitraum aus, mit denen die zukünftige Klimaentwicklung abdeckend beschrieben wird.

Für den ersten Zeitabschnitt im Bewertungszeitraum gibt die zu betrachtende Entwicklung ein Klima vor, das dem heutigen ähnlich ist. Für den ersten Klimazustand sind dementsprechend der Radionuklidtransport und die Exposition der repräsentativen Person unter Anwendung der Klimadaten des aktuellen kühlgemäßigten Klimas in Deutschland zu berechnen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der langfristigen Auswirkungen unter anderem auf den Grundwasserspeicher sowie die Neubildung oder Veränderung der Oberflächengewässer. Zeigt die zu betrachtende Entwicklung eine starke Abkühlung des Klimas in einem späteren Zeitabschnitt im Bewertungszeitraum, könnte das Klima beispielsweise den Klimabedingungen eines Referenzortes aus Ostsibirien entsprechen, welche dann als zweiter klimatischer Zustand angenommen werden könnten. Hier wäre unter anderem zu beachten, dass es bei dieser Klimaentwicklung zur Ausbildung von Permafrostböden kommen kann. Landwirtschaft unter diesen Bedingungen ist nur sehr eingeschränkt möglich und die lokale Vegetation wird von borealen Nadelwäldern dominiert. Dies führt dazu, dass einzelne Lebensmittelgruppen aus Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV nicht zur Exposition der repräsentativen Person führen können, weil deren Produktion unter diesen klimatischen Verhältnissen ausgeschlossen ist. Zeigt die zu betrachtende Entwicklung im folgenden Zeitabschnitt im Bewertungszeitraum eine wesentliche Erwärmung, dann könnte als dritter klimatischer Zustand das semiaride Klima eines Referenzortes aus Zentralspanien herangezogen werden. Hier wäre unter anderem zu beachten, dass die geringen Niederschläge zu einer Verringerung des Grundwasserspeichers und somit zu einer reduzierten Verdünnung der in den Grundwasserspeicher migrierten Radionuklide führen können. Gleichzeitig ist eine verstärkte Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen erforderlich. Anhand der drei beschriebenen sowie aller weiteren zu betrachtenden klimatischen Zustände können im Gesamtergebnis die Auswirkungen der potentiellen Klimaentwicklungen unter anderem auf die Hydrogeologie, die Limnologie, die Geländemorphologie und die Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse dieses Untersuchungsraums für stationäre klimatische Zustände abdeckend beschrieben werden. Maßgebend für die Dosisabschätzung in diesem Untersuchungsraum ist letztlich die höchste abgeschätzte Exposition der repräsentativen Person.



### 12.3 Ausbreitung von Radionukliden und Umweltkontamination

Grundlage für die Abschätzung der 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.

Die modelltechnische Darstellung der hydrologischen und hydrogeologischen Situation im Untersuchungsgebiet über den Bewertungszeitraum ist in möglichst umfassender Konsistenz mit den Ergebnissen der Szenarienentwicklung 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 Geosphärenmodellierung – Biosphärenmodellierung 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:

- Fließrate des kontaminierten Grundwassers aus der Geosphäre in die Biosphäre und die Konzentration gelöster Radionuklide im kontaminierten Grundwasser.
- Eintragsrate gasförmiger Radionuklide aus der Geosphäre in die Biosphäre.
- 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.

Für die Nutzbarkeit von Grundwasser als Trinkwasser, Tränkwasser oder für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen 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.

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.

Bei der Abschätzung der Exposition der repräsentativen Person ist zu berücksichtigen,

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



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

### 12.3.1 Grundwasser

Für alle Untersuchungsräume, in denen Grundwasser im Untergrund im Bewertungszeitraum 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 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 Exposition der repräsentativen Person ungünstigere Variante ist maßgebend.

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 EndlSiUntV vorzugehen. Falls auch dies nicht möglich ist, sind plausible Annahmen zu treffen und zu begründen.

Zusätzlich ist für jeden Untersuchungsraum für den Bewertungszeitraum zu prüfen, ob in Abhängigkeit vom betrachteten klimatischen Zustand aufsteigendes kontaminiertes Grundwasser vorkommt. Wenn dies der Fall ist, ist eine mögliche Kontamination des Bodens infolge aufsteigenden Grundwassers im Rahmen der Modellierungen zu bestimmen.

#### H i n w e i s:

Aufsteigendes Grundwasser kann beispielsweise dann auftreten, wenn einem oberflächennahen Grundwasserleiter klimatisch bedingt dauerhaft erhöhte Niederschläge zugeführt werden oder wenn in einem Untersuchungsraum in Tallage ein Grundwasseranstieg durch Grundwasserzufluss aus dem Einzugsgebiet erfolgt. Wenn dieses Grundwasser durch Radionuklide kontaminiert ist, kann es zu einer Kontamination landwirtschaftlich genutzter Böden im Wurzelbereich und durch die Wurzelaufnahme zur Kontamination pflanzlicher Nahrungs- und Futtermittel kommen.

### 12.3.2 Abschätzung des Wasserdefizits für die Landwirtschaft

Es wird von einer Bewässerung nach Bedarf ausgegangen. Daher ist für jeden Klimazustand die monatlich benötigte Wassermenge zum Ausgleich des Wasserdefizits abzuschätzen. Aufgrund der Saisonalität in den Jahresganglinien 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 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



$T_1$ : Mittlere monatliche Lufttemperatur im Monat I in °C

$F_1$ : Mittlere monatliche relative Luftfeuchte im Monat I in %

$P_1$ : Mittlerer monatlicher Niederschlag im Monat I in mm

Falls  $B_1 < 0$  gemäß Gleichung (1), liegt kein Wasserdefizit vor und es ist  $B_1 = 0$  zu setzen. In diesem Fall erfolgt keine Bewässerung. Ebenso erfolgt unterhalb einer mittleren Monatslufttemperatur von 5 °C keine Bewässerung.

Das Wasserdefizit während der Weidezeit und der Wachstumszeit von pflanzlichen Nahrungsmitteln muss über die Bewässerung ausgeglichen werden. Vereinfachend darf während dieses Zeitraums von einer konstanten Bewässerungsrate landwirtschaftlicher Flächen ausgegangen werden. Für kühlgemäßes Klima ist eine Bewässerung während sechs Monaten eines Jahres zu unterstellen. Sofern die Pflanzen über oberflächennahes Grundwasser versorgt werden, ist keine zusätzliche Bewässerung anzunehmen.

### 12.3.3 Oberflächengewässer

Bei der Nutzung von Oberflächenwasser als Trinkwasser, zum Tränken des Viehs und zur Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen ist vereinfachend davon auszugehen, dass in allen Fällen ungefiltertes Wasser, d. h. Oberflächenwasser einschließlich der darin enthaltenen Schwebstoffe, verwendet wird.

#### H i n w e i s:

Diese Vorgabe bedeutet, dass die Verringerung der Aktivitätskonzentration im Oberflächenwasser durch Sedimentation kontaminierter Schwebstoffe nicht berücksichtigt wird. Durch diese vereinfachende Annahme wird die Exposition der repräsentativen Person infolge der Nutzung kontaminierten Oberflächenwassers überschätzt, eine unangemessen aufwändige Modellierung des Radionuklidtransports in Oberflächengewässern kann jedoch vermieden werden.

#### 12.3.3.1 Ausbreitung radioaktiver Stoffe in Fließgewässern

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).

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 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  $C_r^W$  des Radionuklids  $r$  im Fließgewässer (ungefiltertes Wasser) für den jeweiligen Expositionspfad folgendermaßen berechnet werden:



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

Hier bedeuten:

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

Bei im Wasser gasförmig gelösten Radionukliden, insbesondere C-14 als  $CO_2(aq)$ , ist der Gasaustausch an der Grenzfläche Wasser – Atmosphäre zu berücksichtigen.

### 12.3.3.2 Ausbreitung radioaktiver Stoffe in stehenden Gewässern

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).

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 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 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 Bezugjahres für den jeweiligen Expositionspfad nach folgender Gleichung rekursiv zu berechnen:

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

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  $\text{s}^{-1}$
- $$\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}} = \lambda_r + \frac{1}{V_{\text{Gew}}} \sum_j MQ_k^j$$
- $\lambda_r$ : Physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids  $r$  in  $\text{s}^{-1}$
- $V_{\text{Gew}}$ : Volumen des stehenden Gewässers in  $\text{m}^3$
- $MQ_k^j$ : 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  $\text{Bq}$
- $C_{k,r}^j$ : 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  $\text{s}$

Bei im Wasser gasförmig gelösten Radionukliden, insbesondere C-14 als  $\text{CO}_2$ , ist der Gasaustausch an der Grenzfläche Wasser – Atmosphäre zu berücksichtigen.

### 12.3.3.3 Kontamination von Ufersediment

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  $ri$  im Ufersediment im  $k$ -ten Bezugsjahr ergibt sich unter Berücksichtigung der Tochternuklide folgendes System gewöhnlicher Differentialgleichungen:

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

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

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- $ri$ : 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  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

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.

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:

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

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

Die flächenbezogene Eintragsrate im  $k$ -ten Bezugsjahr durch Sedimentation ist:

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

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

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

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

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

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

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  $\dot{Q}_{U,k,r_i}$  nach Gleichung (7) zu berücksichtigen.

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 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  $\lambda_{\text{Anl},r}$  beschrieben. Für die spezifische Aktivität in Schwebstoffen  $C_r^{\text{Sch}}$  gilt:

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

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeutet hier:

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

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

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

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

$T_{\text{Anl},r}$ : Halbwertszeit für die Anlagerung des Radionuklids  $r$  an Schwebstoffe in Oberflächengewässern in  $\text{s}$ , siehe Anhang A3 Tabelle 7

$t_f$ : Zeit zwischen dem Eintritt des Radionuklids  $r$  in das Oberflächengewässer und der Entnahme des Wassers in  $\text{s}$

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.

Die Verlagerung der Radionuklide in tiefere Schichten des Sediments bleibt unberücksichtigt. Mit Gleichung (4) sind für die langfristige Betrachtung auch sich periodisch wiederholende Ablagerungen, wie z. B. durch jährliche Überschwemmungen, mit abgedeckt.

### 12.3.3.4 Kontamination von Boden und Pflanzen infolge Bewässerung

Die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen mit kontaminiertem Wasser während der Vegetationsperiode führt zur Bodenkontamination. 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) wird durch eine elementspezifische Verweilkonstante berücksichtigt. Für die flächenbezogene Aktivität des



Radionuklide  $r_i$  im Wurzelbereich im  $k$ -ten Bezugsjahr ergibt sich unter Berücksichtigung der Tochternuklide folgendes System gewöhnlicher Differentialgleichungen:

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

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

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  $Bq \cdot m^{-2}$

$\dot{Q}_{W,k,ri}$ : Flächenbezogene Eintragsrate des Radionuklids  $r_i$  durch Bewässerung im  $k$ -ten Bezugsjahr in  $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

$\lambda_{m,ri}$ : Verweilkonstante des Radionuklids  $r_i$  im Wurzelbereich der Pflanzen aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten in  $s^{-1}$ . Für kühlgemäßes Klima dürfen folgende Werte angesetzt werden:

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

	Acker	Weide
für Tc, Cl	$10^{-8} s^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-8} s^{-1}$
für Sr, Ru, I	$10^{-9} s^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-9} s^{-1}$
für Cs, Aktiniden	$10^{-10} s^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-10} s^{-1}$

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.

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:

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

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

Die flächenbezogene Eintragsrate während der Vegetationsperiode im  $k$ -ten Bezugsjahr durch Bewässerung ist:



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

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$W_k$ : Vom Klima abhängige Bewässerungsrate während der Weidezeit und der Wachstumszeit von pflanzlichen Nahrungsmitteln 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)).

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

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

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.

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  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  Trockenmasse;  $m = A$  für Ackerboden,  $m = Wd$  für Weideboden

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

In Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) sind zur Abschätzung der 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.

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 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.

Durch die Berechnung 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:

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

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  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  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.

$\lambda_V$ : Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze in  $\text{s}^{-1}$ . Für kühlgemäßigtes Klima darf  $\lambda_V = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  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 kühlgemäßigtes Klima darf  $t_W^n = 2,6 \cdot 10^6 \text{ s}$  (30 Tage) für n = Wd und  $t_W^n = 5,2 \cdot 10^6 \text{ s}$  (60 Tage) für n = Pf, Bl angesetzt werden.

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

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

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

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

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



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

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  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  Feuchtmasse

$\bar{C}_{k,C-14}^W$ : Mittlere Aktivitätskonzentration von gasförmig im Bewässerungswasser gelöstem C-14 im  $k$ -ten Bezugsjahr in  $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ . Die Aktivitätskonzentration von gasförmig gelöstem C-14 in Oberflächengewässern wird mithilfe der Gleichungen (2) und (3) berechnet. Zusätzlich ist der gasförmige Eintrag von C-14 in die Oberflächengewässer zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 12.3.3.1 und 12.3.3.2).

$f_C^n$ : Massenanteil des Kohlenstoffs in Pflanzen der Gruppe  $n$  (dimensionslos). Für kühlgemäßes Klima beträgt der Wert 0,09 für Weidepflanzen ( $n = \text{Wd}$ ) und 0,18 für pflanzliche Nahrungsmittel ( $n = \text{Bl, Pf}$ ).

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

## 12.3.4 Kontamination der bodennahen Luft

### 12.3.4.1 Gastransport

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 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 stabile atmosphärische Schichtung mit den entsprechenden meteorologischen Parametern derart zugrunde zu legen, dass die Exposition der repräsentativen Person durch Inhalation nicht unterschätzt wird.

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  $\text{CO}_2$  am betrachteten Ort vorliegen. Die spezifische Aktivität in den Pflanzen ist zu berechnen nach:

$$C_{k,C-14}^n = \bar{C}_{k,C-14}^S \cdot \frac{f_C^n}{C_C^L} \quad (16)$$



Hier bedeuten:

$\bar{C}_{k,C-14}^S$ : Mittlere Aktivitätskonzentration von C-14 in Form von CO<sub>2</sub> in der bodennahen Luft während der Wachstumsphase der Pflanzen im k-ten Bezugsjahr in Bq·m<sup>-3</sup>

$C_C^L$ : Kohlenstoffkonzentration der Luft in kg·m<sup>-3</sup>. Der Wert beträgt aktuell 2,0·10<sup>-4</sup> kg m<sup>-3</sup>.

### 12.3.4.2 Resuspension kontaminierten Bodens

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 kühlgemäßigtes Klima beträgt 5·10<sup>-8</sup> kg·m<sup>-3</sup> bezogen auf die Trockenmasse.

Die Ablagerung kontaminierten Staubes führt zur Kontamination oberirdischer Pflanzenteile. Bei 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 Exposition der repräsentativen Person durch Ingestion nicht zu berücksichtigen.

## 12.4 Exposition der repräsentativen Person

Grundlage für die Abschätzung der 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 Verzehrsmengen und die Atemraten der repräsentativen Person.

Für die repräsentative Person ist die über die Lebenszeit (bis einschließlich des 70. Lebensjahres) gemittelte effektive Dosis (gemittelte Jahresdosis) während des Bewertungszeitraums abzuschätzen. Die Jahresdosis ist für jedes Lebensjahr als Summe der Dosen durch äußere und innere Exposition aufgrund der ionisierenden Strahlung der in die Biosphäre migrierten Radionuklide zu berechnen. Bei äußerer Exposition ist die effektive Dosis der repräsentativen Person für das Bezugsjahr, bei innerer Exposition die 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 Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) in der jeweils gültigen Fassung zu verwenden (siehe auch Anhang A2.2). Bei Expositionspfaden, die nach dem Transport radioaktiver Stoffe in die Biosphäre mit einer



Anreicherung in der Umwelt verbunden sind, ist bei der Berechnung die Akkumulation während des Bewertungszeitraums zu berücksichtigen.

Die 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 radioaktiven Stoffe in der Umwelt durch Aufenthalt oder durch den Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchsten Expositionen der repräsentativen Person zu erwarten sind.

Bei den Lebensgewohnheiten (Aufenthaltszeiten, Aufenthaltsorte, Verzehrsmengen, Atemraten) sind für alle klimatischen Zustände die Daten in Anlage 11 Teil B StrlSchV heranzuziehen. Für den Aufenthalt der repräsentativen Person sind die Stellen zugrunde zu legen, an denen sich für die Summe aus äußerer Exposition und Inhalation die höchste über die Lebenszeit gemittelte Jahresdosis ergibt und die für den Daueraufenthalt geeignet sind. Für die Aufenthaltszeiten und -orte der repräsentativen Person im Freien und in Gebäuden sind die Annahmen aus Anhang A4 Tabelle 11 heranzuziehen.

Die Verzehrsmengen in Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV wurden aus statistischen Daten zum Ernährungsverhalten in Deutschland abgeleitet. Für die Lebensmittelgruppe, die bei mittleren jährlichen Verzehrsmengen (Spalten 2 bis 7 der Tabelle 1 in Anlage 11 Teil B StrlSchV) zur höchsten Ingestionssosis 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 Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (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 %.

Als Trink- und Tränkwasser und für die 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).

### 12.4.1 Expositionspfade

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

Zur Abschätzung der äußeren Exposition:

1. Exposition durch Gammastrahlung radioaktiver Stoffe im Boden (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Böden)





2. Exposition durch Gammastrahlung radioaktiver Stoffe im Ufersediment von Oberflächengewässern (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment)

Zur Abschätzung der inneren Exposition bei gasförmigen radioaktiven Stoffen:

3. Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)
4. Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe 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 inneren Exposition bei gelösten radioaktiven Stoffen:

5. Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe 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. Muttermilch infolge der Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Mutter über die oben genannten Ingestionspfade

6. Exposition durch Aufnahme kontaminierten Bodens über den Mund (Bodeningestion)

#### Hinweis:

Die Liste der mindestens zu berücksichtigenden Expositionspfade geht auf generische Betrachtungen und Modellrechnungen zum möglichen Expositionsbeitrag, Anregungen von Beratungsgremien des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie Überlegungen zur Kommunikation der vorliegenden Berechnungsgrundlage zurück. Beispielsweise dürfen zur Abschätzung der äußeren Exposition die Exposition durch Betastrahlung der Luft (Betasubmersion) und die Exposition durch Gammastrahlung der Luft (Gammasubmersion) unberücksichtigt bleiben. Beide Expositionspfade tragen nur unwesentlich zur äußeren Exposition der repräsentativen Person bei, da der Aktivitätsgehalt der Luft durch partikuläre Schwebstoffe und gasförmig gebundene Radionuklide im zeitlichen Mittel nur gering ist.



Bei Milch und Fleisch wird vereinfachend unterstellt, dass diese Nahrungsmittel von Rindern stammen, die auf der Weide grasen oder mit Weidebewuchs gefüttert werden. Hierdurch wird die Exposition der repräsentativen Person überschätzt.

### 12.4.2 Erzeugung von Lebensmitteln

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 effektive Folgedosis durch den Verzehr dieser Lebensmittelgruppe ergibt. Für die Abschätzung der Exposition sind die Nutzungsmöglichkeiten beim Anbau landwirtschaftlicher Produkte in Abhängigkeit von der jeweiligen Entwicklung zugrunde zu legen.

Bei der Erzeugung von Lebensmitteln ist von den aktuell üblichen Wirtschaftsweisen gemäß der guten landwirtschaftlichen Praxis mit schonender Bodenbearbeitung und einer auf die langfristige Bodennutzung ausgerichteten Landwirtschaft (keine Auslaugung der Böden) auszugehen. Es dürfen keine unmöglichen Varianten berücksichtigt werden, wie z. B. Ackerbau während Klimaperioden mit dauerhaft gefrorenen Böden.

### 12.4.3 Abschätzung der äußeren Exposition

Böden können infolge Bewässerung oder aufsteigenden Grundwassers, Uferstreifen durch die Ablagerung von Schwebstoffen kontaminiert werden. Die Jahresdosis  $E_{a,r}$  durch äußere Exposition durch das Radionuklid  $r$  ergibt sich durch Gammastrahlung radioaktiver Stoffe im Boden (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Böden) und durch Gammastrahlung radioaktiver Stoffe im Ufersediment von Oberflächengewässern (Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment).

Die Exposition durch Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten und Spülfeldern darf unberücksichtigt bleiben. Ebenso dürfen die Exposition durch Gammasubmersion und die Exposition durch Betasubmersion unberücksichtigt bleiben.

#### 12.4.3.1 Exposition durch Gammastrahlung radioaktiver Stoffe im Boden (Gammabodenstrahlung)

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 am Ende des  $k$ -ten Bezugsjahres  $B_{k,r}(t_{1a})$  ergibt sich aus Gleichung (9).

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

$$E_{b,r} = g_{b,r,eff} \cdot [f_r \cdot c_{Geo,b1} + (1 - f_r) \cdot c_{Geo,b2}] \cdot (t_{Fr} + f_{Ge,b} \cdot t_{Ge}) \cdot B_{k,r}(t_{1a}) \quad (17)$$



Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$E_{b,r}$ : Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung infolge Bewässerung durch das Radionuklid  $r$  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 am Ende des  $k$ -ten Bezugsjahres in  $Bq \cdot m^{-2}$

Bei aufsteigendem 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 Exposition durch Gammabodenstrahlung ist nicht anhand der Gleichung (17) zu berechnen, sondern mithilfe eines Expositionsmodells nach Stand von Wissenschaft und Technik abzuschätzen.

### 12.4.3.2 Exposition durch Gammastrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment (Gammabodenstrahlung)

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  $U_r$  ( $U_r = 0,05 \text{ m}$ ) und der Sedimentationsgeschwindigkeit abschätzen:



$$t_{\text{eff}} = \frac{U_r}{v_{\text{Se}}} \quad (18)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- $t_{\text{eff}}$ : Zeitspanne, während der Sediment der Dicke  $U_r = 0,05$  m abgelagert wird, in s
- $U_r$ : Effektive Schichtdicke des Sediments zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung in m

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

$$E_{U,r} = g_{b,r,\text{eff}} \cdot f_U \cdot t_A \cdot [f_r \cdot c_{\text{Geo},b1} + (1 - f_r) \cdot c_{\text{Geo},b2}] \cdot O_{k,\text{eff},r}^U \quad (19)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

- $E_{U,r}$ : 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 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  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$

Die flächenbezogene Kontamination der obersten Sedimentschicht  $O_{k,\text{eff},r}^U$  durch das Radionuklid r am Ende des k-ten Bezugsjahres ergibt sich aus Gleichung (4), indem diese Gleichung zwischen der Zeitspanne  $t_{\text{eff}}$  vor dem Ende des k-ten Bezugsjahres und dem Ende des k-ten Bezugsjahres ausgewertet wird.

#### 12.4.4 Abschätzung der inneren Exposition

Die 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 Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch innere Exposition ergibt sich aus der Summe der Jahresdosis durch Inhalation und der Jahresdosis durch Ingestion:

$$E_{i,r} = E_{h,r} + E_{g,r} \quad (20)$$

Hierin bedeuten:

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



### 12.4.4.1 Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)

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

$$E_{h,r} = \bar{C}_r^L \cdot \dot{V} \cdot t_{1a} \cdot g_{h,r,eff} \quad (21)$$

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 12.3.4

$\dot{V}$ : Atemrate in  $m^3 \cdot s^{-1}$ , siehe 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

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:

$$\bar{C}_r^L = AF_{20\mu m,r} \cdot C_r^{Bo} \cdot S_{St} \quad (22)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$AF_{20\mu m,r}$ : Aufkonzentrierungsfaktor für das Radionuklid  $r$ , der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität in der Staubfraktion ( $< 20 \mu m$ ) und der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden beschreibt (dimensionslos). Für kühlgemäßigtes Klima darf  $AF_{20\mu m,r} = 4$  angesetzt werden.

$C_r^{Bo}$ : Spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  im ungesiebten Oberboden in  $Bq \cdot kg^{-1}$  Trockenmasse, siehe Kapitel 12.3.1 und 12.3.3.4

$S_{St}$ : Referenzwert für die Staubkonzentration in der bodennahen Luft in  $kg \cdot m^{-3}$ . Für kühlgemäßigtes Klima darf  $S_{St} = 5 \cdot 10^{-8} kg \cdot m^{-3}$  bezogen auf die Trockenmasse angesetzt werden.

Es ist davon auszugehen, dass in Gebäuden die gleiche Staubkonzentration wie im Freien vorliegt. Falls für die Feinkornfraktion  $< 20 \mu m$  ein Wert für die spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  geschätzt und plausibel begründet werden kann, ist in Gleichung (22) dieser Wert anstelle des Produkts  $AF_{20\mu m,r} \cdot C_r^{Bo}$  zu verwenden.



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

Die Exposition durch Ingestion ergibt sich durch die mit Lebensmitteln und Muttermilch aufgenommene Aktivität. Für die Annahmen über die Ernährungsgewohnheiten der repräsentativen Person gilt Anhang A4 Tabelle 9 bzw. Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV.

Die Jahresdosis (effektive Folgedosis)  $E_{g,r}$  ohne Berücksichtigung von Dekontaminationseffekten bei der lebensmitteltechnologischen und haushaltsmäßigen Zubereitung ist für die repräsentative Person in den Altersgruppen  $> 1$  a:

$$E_{g,r} = (f_{Tw} \cdot U^{Tw} \cdot \tilde{C}_r^{Tw} + f_{Fi} \cdot U^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl}) \cdot g_{g,r,eff} \quad (23)$$

Hierin bedeuten:

$E_{g,r}$ : Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Ingestion des Radionuklids  $r$  in Sv

$U^n$ : Jährliche Verzehrsmenge der Lebensmittelgruppe  $n$  in kg, siehe 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) 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 (33)

$\tilde{C}_r^{Pf}$ : Spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  in pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse zum Zeitpunkt des Verzehrs in  $Bq \cdot kg^{-1}$ , siehe Gleichung (14) 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) 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 (28) und (30)

$\tilde{C}_r^{Fl}$ : Spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  in Fleisch und Fleischwaren zum Zeitpunkt des Verzehrs in  $Bq \cdot kg^{-1}$ , siehe Gleichungen (29) und (31)



$g_{g,r,eff}$ : Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Ingestion des Radionuklids  $r$  in  $Sv \cdot Bq^{-1}$ , siehe Anhang A2.2

Für die repräsentative Person in der Altersgruppe  $\leq 1$  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 Jahresdosis (effektive Folgedosis) ohne Berücksichtigung von Dekontaminationseffekten bei der lebensmitteltechnologischen und haushaltsmäßigen Zubereitung ist für die repräsentative Person der Altersgruppe  $\leq 1$  a daher wie folgt zu berechnen:

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

$$E_{g,r} = (f_{TW} \cdot U_{\leq 1a}^{TW} \cdot \tilde{C}_r^{TW} + f_{Fi} \cdot U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl}) \cdot g_{g,r,eff} + A_r^{g;1a} \cdot g_{g,r,eff}^{MM} + A_r^{h;1a} \cdot g_{h,r,eff}^{MM} \quad (24)$$

Andernfalls ist

$$E_{g,r} = \left[ f_{TW} \cdot U_{\leq 1a}^{TW} \cdot \tilde{C}_r^{TW} + f_{Fi} \cdot U_{\leq 1a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{\leq 1a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{\leq 1a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U_{\leq 1a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{\leq 1a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} + \frac{1}{365 \cdot a_d} \cdot (A_r^{g;1a} \cdot T_r^{MM,g} + A_r^{h;1a} \cdot T_r^{MM,h}) \cdot U^{MM} \right] \cdot g_{g,r,eff} \quad (25)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$a_d$ : Zeitraum eines Tages;  $a_d = 1$  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 (26)

$A_r^{h;1a}$ : Aktivität des Radionuklids  $r$  in Bq, die jährlich von der stillenden Mutter durch Inhalation aufgenommen wird, siehe Gleichung (27)

$T_r^{MM,g}$ : Transferfaktor von Lebensmitteln in die Muttermilch für das Radionuklid  $r$  in  $d \cdot kg^{-1}$ , 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  $d \cdot kg^{-1}$ , 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 Anhang A4 Tabelle 9 und Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV

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

$$A_r^{g;1a} = f_{TW} \cdot U_{>17a}^{TW} \cdot \tilde{C}_r^{TW} + f_{Fi} \cdot U_{>17a}^{Fi} \cdot \tilde{C}_r^{Fi} + f_{Pf} \cdot U_{>17a}^{Pf} \cdot \tilde{C}_r^{Pf} + f_{Bl} \cdot U_{>17a}^{Bl} \cdot \tilde{C}_r^{Bl} + f_{Mi} \cdot U_{>17a}^{Mi} \cdot \tilde{C}_r^{Mi} + f_{Fl} \cdot U_{>17a}^{Fl} \cdot \tilde{C}_r^{Fl} \quad (26)$$



Hierbei sind für die Mutter die mittleren jährlichen Verzehrsmengen in Anhang A4 Tabelle 9 bzw. Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV anzusetzen.

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

$$A_r^{h;1a} = \bar{C}_r^L \cdot \dot{V}_{>17a} \cdot t_{1a} \quad (27)$$

### 12.4.4.2.1 Kontamination von Milch und Fleisch

Milch und Fleisch können durch kontaminiertes Tränkwasser und durch kontaminiertes Futter kontaminiert werden.

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

$$\tilde{C}_r^{Mi} = C_r^W \cdot L \cdot T_r^{Mi} \quad (28)$$

$$\tilde{C}_r^{Fl} = C_r^W \cdot L \cdot T_r^{Fl} \quad (29)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$L$ : Täglicher Wasserkonsum des Rinds in  $l \cdot d^{-1}$ . Für kühlgemäßes Klima darf  $L = 100 l \cdot d^{-1}$  angesetzt werden.

$T_r^{Mi}$ : Transferfaktor vom Tränkwasser bzw. Futter in die Milch für das Radionuklid  $r$  in  $d \cdot kg^{-1}$ , siehe Anhang A3 Tabelle 5

$T_r^{Fl}$ : Transferfaktor vom Tränkwasser bzw. Futter in das Fleisch für das Radionuklid  $r$  in  $d \cdot kg^{-1}$ , siehe Anhang A3 Tabelle 5

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 Tier nicht in organische Verbindungen umgesetzt werden.

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:

$$\tilde{C}_r^{Mi} = C_r^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T_r^{Mi} \quad (30)$$

$$\tilde{C}_r^{Fl} = C_r^{Fu} \cdot \dot{M}_{Fu} \cdot T_r^{Fl} \quad (31)$$

Außer den bereits erklärten Symbolen bedeuten hier:

$C_r^{Fu}$ : Spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  im Futter der Tiere (Weidebewuchs) in  $Bq \cdot kg^{-1}$  Feuchtmasse





$\dot{M}_{Fu}$ : Tägliche Aufnahme von Futter (Weidebewuchs) in  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$  Feuchtmasse. Für kühlgemäßes Klima darf  $\dot{M}_{Fu} = 70 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$  angesetzt werden.

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

$$C_r^{Fu} = C_r^{Wd} \quad (32)$$

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  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  Frischmasse, nach den Gleichungen (14), (15) und (16) berechnet

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 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 Tiere mit Lagerfutter gefüttert werden, ist die spezifische Aktivität im Futter der Tiere auf diese Weise zu berechnen.

#### 12.4.4.2 Kontamination von Fischfleisch (Süßwasserfisch)

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

$$\tilde{C}_r^{Fi} = C_r^W \cdot T_r^{Fi} \quad (33)$$

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

#### 12.4.4.3 Exposition durch Aufnahme kontaminierten Bodens über den Mund (Bodeningestion)

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

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

Hier bedeuten:



- $E_{g,r}$ : Jahresdosis (effektive Dosis) durch die Aufnahme des Radionuklids  $r$  mit kontaminiertem Boden über den Mund in Sv
- $AF_{500\mu m,r}$ : Aufkonzentrierungsfaktor für das Radionuklid  $r$ , der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivität des Radionuklids  $r$  in der Bodenfraktion  $< 500 \mu m$  und der spezifischen Aktivität im ungesiebten Oberboden beschreibt (dimensionslos). Für kühlgemäßiges Klima darf  $AF_{500\mu m,r} = 2$  angesetzt werden.
- $C_r^{Bo}$ : Spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  im ungesiebten Oberboden in  $Bq \cdot kg^{-1}$  Trockenmasse, siehe Kapitel 12.3.1 und 12.3.3.4
- $U^{Bo}$ : Jährliche Menge von Boden, der über den Mund aufgenommen wird, in kg Trockenmasse. Für kühlgemäßiges Klima dürfen folgende Werte angesetzt werden:

**Tabelle 3: Jährliche Menge von über den Mund aufgenommenem Boden**

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

Falls für die Feinkornfraktion  $< 500 \mu m$  ein Wert für die spezifische Aktivität des Radionuklids  $r$  geschätzt und plausibel begründet werden kann, ist in Gleichung (34) dieser Wert anstelle des Produkts  $AF_{500\mu m,r} \cdot C_r^{Bo}$  zu verwenden.



### 13 Literatur

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) vom 08.06.2020. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BAnz AT 16.06.2020 B3.

Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau – BglBb). Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-SW-07/10, 2010. urn:nbn:de:0221-20100329966.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (2009) Impact of climate change on far-field and biosphere processes for a HLW-repository in rock salt. GRS-241.

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. - 5 - 2510) geändert worden ist, in der jeweils geltenden Fassung.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (1999) Verification and Validation of Software Related to Nuclear Power Plant Instrumentation and Control, Technical Reports Series No. 384, IAEA, Wien.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2000a) Software for Computer Based Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.1, IAEA, Wien.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2000b) Quality Assurance for Software Important to Safety, Technical Reports Series No. 397, IAEA, Wien.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2003) Radioactive Waste Management Glossary, IAEA, Wien.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2004) Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume I, IAEA, Wien.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2019 IAEA Safety Glossary: 2018 Edition, IAEA, Wien.

OECD-NEA (2015) Scenario Development Workshop Synopsis, Radioactive Waste Management, Integration Group for the Safety Case Workshop Synopsis, NEA/RWM/R(2015)3.

Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Entwurf der Bundesregierung vom 6. April 2020, veröffentlicht am 19. Mai 2020. Beinhaltet die ENDLAGERSICHERHEITSANFORDERUNGSVERORDNUNG (EndlSiAnfV) sowie die ENDLAGERSICHERHEITSUNTERSUCHUNGSVERORDNUNG (EndlSiUntV). Abrufbar unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Glaeserne\\_Gesetze/19.\\_Lp/endlsianf\\_verordnung/Entwurf/endlsianf\\_vo\\_refe\\_verordnung\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/endlsianf_verordnung/Entwurf/endlsianf_vo_refe_verordnung_bf.pdf); geprüft am 25. März 2022.

Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert worden ist.



## Anhang A1. Sprachliche Konventionen

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 getroffen. Die für die Berechnungsgrundlage angewendeten Stelle (Anhang A des KTA-Merkblattes) ist nachfolgend für die Berechnungsgrundlage in modifizierter Form wiedergegeben:

### A1.1 Gebrauch modaler Hilfsverben

#### (1) Unbedingte Anforderungen

##### a) Gebote:

- muss - müssen
- ist zu - sind zu
- hat zu - haben zu
- darf nur - dürfen nur

##### b) Verbote:

- darf nicht - dürfen nicht
- ist ... nicht zugelassen - sind ... nicht zugelassen
- ist nicht zulässig - sind nicht zulässig

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

#### (2) Bedingte Anforderungen

- soll - sollen
- soll nicht - sollen nicht

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

#### (3) Erlaubnisse (Zulässigkeit)

- darf - dürfen
- ist ... zugelassen - sind ... zugelassen
- ist ... zulässig - sind ... zulässig
- muss nicht - müssen nicht
- braucht ... nicht zu ... - brauchen ... nicht zu

##### aber nicht:

- kann - können



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

#### (4) Empfehlungen

- sollte - sollten

- 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.

#### (5) Feststellungen

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

- kann - können

- es ist möglich, dass ... - es ist möglich, dass...

- lässt sich ... - lassen sich...

- vermag - vermögen

aber nicht:

- darf - dürfen

- ist zu ... - sind zu...



## Anhang A2. Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten

### A2.1 Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung $g_{b,r,eff}$ ( $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ) und Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei Gammabodenstrahlung

Es sind die Dosisleistungskoeffizienten für Gammabodenstrahlung sowie die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen bei äußerer Exposition gemäß Anlage 18 Teil B Nummer 4 StrlSchV zu verwenden.

Die Dosisleistungskoeffizienten in der oben genannten Zusammenstellung sind auf Referenzpersonen der Altersgruppe  $> 17$  a bezogen.

Für Referenzpersonen der Altersgruppen  $\leq 17$  a sind wegen der geringeren Organabschirmung und der geringeren Körpergröße die jeweils genannten Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen anzuwenden.

### A2.2 Inhalationsdosiskoeffizienten $g_{h,r,eff}$ ( $Sv \cdot Bq^{-1}$ ) und Ingestionsdosiskoeffizienten $g_{g,r,eff}$ ( $Sv \cdot Bq^{-1}$ )

Es sind die Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion gemäß Anlage 18 Teil B Nummer 4 StrlSchV zu verwenden.

Für C-14 ist der Inhalationsdosiskoeffizient für  $CO_2$  bzw. der Ingestionsdosiskoeffizient für organische Verbindungen anzuwenden. Ist die chemische Verbindung des C-14 bekannt, ist der jeweilige Inhalationsdosiskoeffizient heranzuziehen.

Bei Unkenntnis der Lungenabsorptionsklasse bzw. Ingestionsklasse der Radionuklidverbindung ist die ungünstigste Klasse den Berechnungen der Folgedosis zugrunde zu legen, d. h. die Klasse, die den höchsten Beitrag zur effektiven Folgedosis ergibt. Der Berechnung der effektiven Folgedosis ist für jedes Radionuklid die Lungenabsorptions- bzw. Ingestionsklasse zugrunde zu legen, bei der der höchste Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis vorliegt.

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



Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM} (Sv \cdot Bq^{-1})$	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM} (Sv \cdot Bq^{-1})$
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)





Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM} (Sv \cdot Bq^{-1})$	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM} (Sv \cdot Bq^{-1})$
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)
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	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$



Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM} (Sv \cdot Bq^{-1})$	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM} (Sv \cdot Bq^{-1})$
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	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
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	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$



Radionuklid	Ingestion durch die Mutter $g_{g,r,eff}^{MM} \text{ (Sv} \cdot \text{Bq}^{-1})$	Inhalation durch die Mutter $g_{h,r,eff}^{MM} \text{ (Sv} \cdot \text{Bq}^{-1})$
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	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$

<sup>1)</sup> OBT: organisch gebundenes Tritium

Die Daten sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.



### 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 <sup>-1</sup> Milch)	$T_r^{Fl}$ in (d·kg <sup>-1</sup> Fleisch)
H	– <sup>3)</sup>	– <sup>3)</sup>	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Be	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
C	– <sup>3)</sup>	– <sup>3)</sup>	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
F	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Na	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
Mg	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Al	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Si	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
P	$5 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
S	$9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
Cl	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
K	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^0$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Ca	$2 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Sc	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$
V	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Cr	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Mn	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Fe	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Co	$9 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Ni	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Cu	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Zn	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$
Ga	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Ge	$2 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-1}$
As	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Se	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Br	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Rb	$9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Sr	$3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Y	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Zr	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Nb	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-1}$
Mo	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
Tc	$2 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Ru	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$



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 <sup>-1</sup> Milch)	$T_r^{Fl}$ in (d·kg <sup>-1</sup> Fleisch)
Rh	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Pd	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Ag	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Cd	$8 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$
In	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Sn	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$
Sb	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Te	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-2}$
I	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
Cs	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Ba	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
La	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Ce	$7 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Pr	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Nd	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Pm	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Sm	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Eu	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Gd	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Tb	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Dy	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Ho	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Er	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Tm	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Yb	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Lu	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Hf	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-1}$
Ta	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-1}$
W	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Re	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Os	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-1}$
Ir	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Pt	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Au	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Hg	$7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-1}$
Tl	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
Pb	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Bi	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Po	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$



Element	$T_r^{Wd}$ in $\frac{Bq/kg \text{ FM}}{Bq/kg \text{ TM}}$ <sup>2)</sup> (–)	$T_r^{Pf}, T_r^{Bl}$ in $\frac{Bq/kg \text{ FM}}{Bq/kg \text{ TM}}$ <sup>2)</sup> (–)	$T_r^{Mi \ 1)}$ in (d·kg <sup>-1</sup> Milch)	$T_r^{Fl}$ in (d·kg <sup>-1</sup> Fleisch)
At	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$
Ra	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
Ac	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Th	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Pa	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$
U	$9 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Np	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Pu	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Am	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Cm	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Bk	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Cf	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$

1) Für diesen Transferfaktor wird in der Literatur üblicherweise die Einheit d·l<sup>-1</sup> verwendet.

2) FM = Feuchtmasse

TM = Trockenmasse

3) Entfällt, Berechnung erfolgt nach dem spezifischen Aktivitätsmodell

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 Exposition nicht zu erwarten ist.

Die Daten sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.

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

Element	$T_r^{MM,g \ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)	$T_r^{MM,h \ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)
H	0,5	0,2 (Schwebstoffe) 0,5 (HTO, OBT) 0,005 (tritiiertes Methan) $5 \cdot 10^{-5}$ (elementares Tritium)
Be	0,006	0,1
C	0,3	0,1 (Schwebstoffe, CO) 0,3 (CO <sub>2</sub> , Kohlenstoffdampf)
F	0,02	0,007
Na	0,05	0,02
Mg	0,1	0,06



Element	$T_r^{MM,g\ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)	$T_r^{MM,h\ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)
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 <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> )
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
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



Element	$T_r^{MM,g\ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)	$T_r^{MM,h\ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)
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
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





Element	$T_r^{MM,g \ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)	$T_r^{MM,h \ 1)}$ (d·kg <sup>-1</sup> Muttermilch)
Ra	0,2	0,3
Ac	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Th	0,02	0,3
Pa	$6 \cdot 10^{-4}$	0,1
U	0,02	0,2
Np	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Pu	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Am	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Cm	$6 \cdot 10^{-4}$	0,3
Bk	$6 \cdot 10^{-4}$	0,1
Cf	$6 \cdot 10^{-4}$	0,1

1) Für diesen Transferfaktor wird in der Literatur üblicherweise die Einheit d·l<sup>-1</sup> 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 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 sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.

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

Elementgruppe	$K_{Se,r}$ (l·kg <sup>-1</sup> )	$T_{Anl,r}$ (d)	$\lambda_{Anl,r}$ (s <sup>-1</sup> )	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 sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.



**Tabelle 8: Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch (Süßwasserfisch)**

Element	Konzentrationsfaktor $T_r^{Fi}$ in $l \cdot kg^{-1}$	
	Festwert	Gleichung <sup>1)</sup>
H	1	
C	8000 <sup>2)</sup>	
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	
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	



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

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

<sup>2)</sup> 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 sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.



### Anhang A4. Lebensgewohnheiten der repräsentativen Person

**Tabelle 9: Jährliche Verzehrsmengen der repräsentativen Person**

	Jährliche Verzehrsmenge in kg							
1	2	3	4	5	6	7	8	
Altersgruppe	≤1 Jahr	> 1 - ≤2 Jahre	> 2 - ≤7 Jahre	> 7 - ≤12 Jahre	> 12 - ≤17 Jahre	> 17 Jahre		
Lebensmittel								
Trinkwasser	55 <sup>1)</sup>	100	100	150	200	350	2	
Muttermilch, Milchfertig- produkte mit Trinkwasser	200 <sup>1,2)</sup>	-	-	-	-	-	1,6	
Milch, Milchprodukte	45	160	160	170	170	130	3	
Fisch <sup>3)</sup>	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	

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Je nach Nuklidzusammensetzung ist die ungünstigste Ernährungsvariante zugrunde zu legen.

<sup>3)</sup> 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) zur höchsten Ingestionsdosis (effektive Folgedosis) 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.

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 sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.

**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 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Die Daten sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.

**Tabelle 11: Aufenthaltszeiten der repräsentativen Person und Reduktionsfaktoren**

Expositionspfade	Aufenthaltsdauern und -orte	Reduktionsfaktor
Gammastrahlung der radioaktiven Stoffe 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 radioaktiver Stoffe	$6,3 \cdot 10^6$ 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 Exposition sind die in Anhang A4 Tabelle 11 genannten Zahlenwerte für die jeweiligen Expositionspfade zu verwenden. Für den Aufenthalt im Freien sind folgende Fälle zu betrachten:

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 Exposition ist die insgesamt ungünstigste Variante zugrunde zu legen.

Die Daten sind der Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036) entnommen.



### 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: $a_w = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$
$A_{k,r}$	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
$B_{k,r}(t)$	Flächenbezogene Bodenkontamination im Wurzelbereich durch das Radionuklid $r$ im $k$ -ten Bezugsjahr 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 $\text{CO}_2$ in der bodennahen Luft während der Wachstumsphase der Pflanzen im $k$ -ten Bezugsjahr in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$
$C_{k,r}^j$	Mittlere Aktivitätskonzentration des Radionuklids $r$ im Zufluss $j$ während des $k$ -ten Bezugsjahres in $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$



Symbol	Definition
$C_{k,r}^m(t_{1a})$	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
$C_{k,r}^n$	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
$C_{k,r}^W$	Aktivitätskonzentration des Radionuklids $r$ im stehenden Gewässer am Ende des $k$ -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot l^{-1}$
$C_r^{Bo}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids $r$ im ungesiebten Oberboden in $Bq \cdot kg^{-1}$ Trockenmasse
$C_r^{Fu}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids $r$ im Futter der Tiere (Weidebewuchs) in $Bq \cdot kg^{-1}$ Feuchtmasse
$\bar{C}_r^L$	Jahresmittel der Aktivitätskonzentration des Radionuklids $r$ in der bodennahen Luft in $Bq \cdot m^{-3}$
$\tilde{C}_r^n$	Spezifische Aktivität des Radionuklids $r$ im Lebensmittel der Gruppe $n$ zum Zeitpunkt des Verzehrs in $Bq \cdot kg^{-1}$ $n = Tw$ Trinkwasser $n = Fi$ Fischfleisch (Süßwasserfisch) $n = Pf$ pflanzliche Nahrungsmittel außer Blattgemüse $n = Bl$ Blattgemüse $n = Mi$ Milch und Milchprodukte $n = Fl$ Fleisch und Fleischwaren
$C_{k,r}^{Sch}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids $r$ in Schwebstoffen im $k$ -ten Bezugsjahr in $Bq \cdot kg^{-1}$ Trockenmasse
$C_{k,r}^W$	Aktivitätskonzentration des Radionuklids $r$ im Fließgewässer (ungefiltertes Wasser) im $k$ -ten Bezugsjahr in $Bq \cdot l^{-1}$ Aktivitätskonzentration des Radionuklids $r$ im stehenden Gewässer (ungefiltertes Wasser) am Ende des $k$ -ten Bezugsjahres in $Bq \cdot l^{-1}$
$C_r^{Wd}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids $r$ im Weidebewuchs zum Zeitpunkt des Grasens bzw. zum Zeitpunkt der Ernte in $Bq \cdot kg^{-1}$ Frischmasse
$E_{b,r}$	Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung infolge Bewässerung durch das Radionuklid $r$ in Sv
$E_{g,r}$	Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Ingestion des Radionuklids $r$ in Sv
$E_{h,r}$	Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch Inhalation des Radionuklids $r$ in Sv
$E_i$	Gamma-Energie in MeV
$E_{i,r}$	Jahresdosis (effektive Folgedosis) durch innere Exposition durch das Radionuklid $r$ in Sv
$E_{U,r}$	Jahresdosis (effektive Dosis) durch Gammabodenstrahlung bei Aufenthalt auf Ufersediment durch das Radionuklid $r$ in Sv
$f_C^n$	Massenanteil des Kohlenstoffs in Pflanzen der Gruppe $n$ (dimensionslos)
$F_l$	Mittlere monatliche relative Luftfeuchte im Monat $l$ in %



Symbol	Definition
$f_{\text{Ge,b}}$	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)
$g_{b,r,\text{eff}}$	Dosisleistungskoeffizient für die effektive Dosis durch Gammabodenstrahlung des Radionuklids r in $\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
$g_{g,r,\text{eff}}$	Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Ingestion des Radionuklids r in $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$
$g_{h,r,\text{eff}}$	Dosiskoeffizient für die effektive Folgedosis durch Inhalation des Radionuklids r in $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$
j	Index zur Kennzeichnung des Zuflusses des stehenden Gewässers
k	Index zur Kennzeichnung des Bezugsjahres
$K_{\text{Se},r}$	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 $\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$
$\lambda_{\text{Anl},r}$	Anlagerungskonstante des Radionuklids r an Schwebstoffe in $\text{s}^{-1}$
$\lambda_{\text{eff},k,r}^{\text{Gew}}$	Effektive Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r im stehenden Gewässer während des k-ten Bezugsjahres in $\text{s}^{-1}$
$\lambda_{m,r}$	Verweilkonstante des Radionuklids r im Wurzelbereich der Pflanzen aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten in $\text{s}^{-1}$
$\lambda_r$	Physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r in $\text{s}^{-1}$
$\lambda_V$	Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Pflanze in $\text{s}^{-1}$
m	Index zur Kennzeichnung des Bodens m = A für Ackerboden m = Wd für Weideboden
$\dot{M}_{\text{Fu}}$	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 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
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





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



Symbol	Definition
$T_r^n$	Transferfaktor vom Boden zur Pflanze der Gruppe n für das Radionuklid r in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Feuchtmasse pro $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ Trockenboden, jeweils für pflanzliche Nahrungsmittel ( $n = \text{Pf, Bl}$ ) oder für Weidepflanzen ( $n = \text{Wd}$ )
$U^{\text{Bo}}$	Jährliche Menge von Boden, der über den Mund aufgenommen wird, in kg Trockenmasse
$U^{\text{MM}}$	Jährliche Verzehrsmenge an Muttermilch in kg
$U^n$	Jährliche Verzehrsmenge der Lebensmittelgruppe n in kg $n = \text{Tw}$ 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
$U_r$	Effektive Schichtdicke des Sediments zur Berücksichtigung der Selbstabschirmung in m
$v_{\text{Se}}$	Sedimentationsgeschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{V}$	Atemrate in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$V_C$	Assimilationsrate für Kohlenstoff in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$V_{\text{Gew}}$	Volumen des stehenden Gewässers in $\text{m}^3$
$W_k$	Vom Klima abhängige Bewässerungsrate während der Weidezeit und der Wachstumszeit von pflanzlichen Nahrungsmitteln im k-ten Bezugsjahr in $\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$Y_i$	pro Zerfall emittierte Gamma-Quanten der Energie $E_i$
$Y^n$	Ertrag bzw. Bewuchsdichte von Pflanzen der Gruppe n in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ Feuchtmasse $n = \text{Bl}$ Ertrag von Blattgemüse $n = \text{Pf}$ Ertrag von pflanzlichen Nahrungsmitteln außer Blattgemüse $n = \text{Wd}$ Bewuchsdichte von Weidepflanzen