



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

# SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**BEITRAG ZUR ERSTELLUNG EINER REFERENZBIOSPHERE  
ZUR BERECHNUNG DER IN DER NACHBETRIEBSPHASE  
EINES ENDLAGERS FÜR RADIOAKTIVE STOFFE  
HERVORGERUFENEN POTENTIELLEN STRAHLENEXPOSITION  
UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES EINFLUSSES DES KLIMAS**

**BMU - 2003-623**



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

**BMU – 2003-623**

**Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre  
zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines  
Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen  
potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung  
des Einflusses des Klimas**

A. Becker

## **IMPRESSUM**

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht wurde durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS), Köln erstellt.

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

### **Herausgeber:**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Arbeitsgruppe RS I 1  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn

Erscheinungsjahr: 2003

## Kurzfassung

Die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern radioaktiver Abfälle anhand von in Langzeitsicherheitsanalysen berechneten Dosen oder Risiken erfordert die Einbeziehung eines Biosphärenmodells. Die Entwicklung der Biosphäre und hiervon beeinflusst die Lebens- und Verzehrsgewohnheiten des Menschen können jedoch in den betrachteten Zeiträumen nicht prognostiziert werden, da sie stark von klimatischen Faktoren und von Änderungen der menschlichen Gesellschaft abhängen, die sich einer Prognose auch über vergleichsweise kurze Zeiträume entziehen. Zur Illustration der von einem Endlager ausgehenden Gefährdung können stattdessen so genannte Referenzbiosphären herangezogen werden.

Eine Referenzbiosphäre ist eine Sammlung von Annahmen und Hypothesen, die zur Erstellung einer konsistenten Basis für die Berechnung der Strahlenexposition notwendig ist. Die Referenzbiosphäre soll so zusammengesetzt sein, dass die Strahlenexposition nicht unterschätzt wird, gleichzeitig aber so einfach wie möglich sein. Im vorliegenden Bericht wird die Erstellung einer solchen Referenzbiosphäre dargestellt. Zu diesem Zweck wurden ausgehend von den klimatischen Verhältnissen, wie sie während der letzten Million Jahre im norddeutschen Raum geherrscht haben, Biosphärenmodelle entworfen und ihr Einfluss auf die Höhe der Strahlenexposition untersucht.

Schlussfolgernd wird als Referenzbiosphäre eine Biosphäre mit Mittelmeerklima vorgeschlagen, in der die Ernährung überwiegend auf pflanzlicher Basis beruht. Weitere Biosphären, in denen ungefähr die gleiche Strahlenexposition auftreten kann, sind möglich; sie sind jedoch komplexer aufgebaut und daher mit größeren Unsicherheiten behaftet. Eine Biosphäre, in der die Strahlenexposition durch jedes einzelne Radionuklid maximal ist, existiert nicht.

Die Reduzierung der Referenzbiosphäre auf Trinkwasserverzehr als einzigen Expositionspfad ist nicht sinnvoll, da ein solcher Ansatz den spezifischen Beitrag einzelner Radionuklide zur Gesamtexposition nicht ausreichend berücksichtigen würde.

## **Abstract**

The assessment of the long-term safety of final repositories for radioactive wastes using doses or risks calculated in long-term safety analyses requires the utilisation of biosphere models. However, the evolution of the biosphere and, depending on it, the living and nutrition habits of man cannot be predicted in the timeframes under question since they strongly depend on climatic factors and changes of human society which are not amenable to prognoses even over short timeframes. Instead, in order to illustrate the hazard potentially caused by a repository, so-called reference biospheres can be utilised.

A reference biosphere is a collection of assumptions and hypotheses necessary for a consistent base for the calculation of radiation exposure. It should be constructed in a way that exposure will not be underestimated but, at the same time, should be as simple as possible. In the report presented here the construction of such a biosphere is demonstrated. For this purpose biosphere models are developed starting with climatic conditions as they took place in northern Germany during the last million years and the influence of these models on radiation exposure is evaluated.

As conclusion, a biosphere with Mediterranean climate and nutrition mainly based on crops is proposed. Other biospheres resulting approximately in the same values of exposure are possible but they are of greater complexity and therefore linked with greater uncertainties. There is no biosphere for which exposure reaches its maximum for every single radionuclide.

The reduction of the reference biosphere to drinking water consumption as only exposure pathway is not sensible since such an approach would not sufficiently take into account the specific contribution of certain radionuclides to total exposure.

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das Grundszenario</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Mögliche Klimaszenarien</b> .....	<b>8</b>
3.1	Definition .....	8
3.2	Potentielle Klimasituationen an einem deutschen Endlagerstandort .....	9
<b>4</b>	<b>Biosphären unter ausgewählten Klimasituationen</b> .....	<b>12</b>
4.1	Vorbemerkung .....	12
4.2	Klima des ewigen Frostes (EF) .....	14
4.3	Tundrenklima (ET ) .....	15
4.3.1	Klimatische Situation.....	15
4.3.2	Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna .....	17
4.3.3	Gewinnung der Nahrungsmittel.....	19
4.3.4	Expositionspfade .....	20
4.3.5	Platzbedarf der Dorfgemeinschaft .....	21
4.3.6	Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft .....	24
4.4	Feuchtwinterkaltes Klima (Df) .....	26
4.4.1	Klimatische Situation.....	26
4.4.2	Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna .....	27
4.4.3	Gewinnung der Nahrungsmittel.....	28
4.4.4	Expositionspfade .....	30
4.4.5	Platzbedarf der Dorfgemeinschaft .....	32
4.4.6	Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft .....	35
4.5	Wintertrockenes Klima (Dw).....	38
4.5.1	Klimatische Situation.....	38

4.5.2	Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna .....	38
4.5.3	Gewinnung der Nahrungsmittel.....	39
4.5.4	Expositionspfade .....	41
4.5.5	Platz- und Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft.....	42
4.6	Feuchtgemäßigtes Klima (Cf) .....	45
4.6.1	Klimatische Situation.....	45
4.6.2	Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna .....	50
4.6.3	Gewinnung der Nahrungsmittel.....	51
4.6.4	Expositionspfade .....	53
4.6.5	Platz- und Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft.....	54
4.7	Etesienklima (Es) .....	58
4.7.1	Klimatische Situation.....	58
4.7.2	Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna .....	60
4.7.3	Landwirtschaft und Gewinnung von Nahrung .....	61
4.7.4	Expositionspfade .....	63
4.7.5	Platz- und Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft.....	64
<b>5</b>	<b>Modellierung .....</b>	<b>68</b>
5.1	Allgemeine Vorbemerkung.....	68
5.2	Pfad: Trinkwasser .....	71
5.3	Pfad: Fischverzehr .....	73
5.4	Pfad: im Überschwemmungsgebiet wild wachsende Beeren und Pilze .....	75
5.5	Pfad: Pflanzenzucht im Überschwemmungsgebiet.....	78
5.6	Pfad: Viehzucht im Überschwemmungsgebiet.....	79
5.7	Pfad: Beregnungsfeldbau .....	82
5.7.1	FEP-Listen .....	82
5.7.2	Äußere Kontamination der oberirdischen Pflanzenteile .....	86
5.7.3	Interne Kontamination der Pflanzen.....	87

5.8	Pfad: Unter-Glas-Kultur.....	91
5.9	Pfad: Verzehr von Milch und Fleisch von Tieren, die Futter von beregneten Weiden und Feldern erhalten haben .....	91
5.10	Pfad: Verzehr von Milch und Fleisch nach Tränkung von Tieren .....	91
5.11	Pfad: orale Aufnahme von Erde.....	93
5.12	Pfad: Inhalation von Staub.....	93
5.13	Pfad: Inhalation von Wasserdampf.....	94
5.14	Pfad: Externe Strahlenexposition.....	94
<b>6</b>	<b>Parameterwerte .....</b>	<b>97</b>
6.1	Angaben über Ingestions- und Inhalationsraten sowie den Aufenthalt in kontaminierten Gebieten.....	97
6.2	Pfad: Trinkwasserverzehr .....	99
6.3	Pfad: Fischverzehr .....	99
6.4	Pfad: Beeren und Pilze aus Überschwemmungsgebieten .....	102
6.5	Pfad: Pflanzenzucht im Überschwemmungsgebiet.....	104
6.6	Pfad: Viehzucht im Überschwemmungsgebiet.....	105
6.7	Pfad: Berechnungsfeldbau .....	108
6.7.1	Parameterwerte für die Berechnung der direkten Kontamination der Pflanzenblätter nach Formel 5.7.1 .....	108
6.7.2	Rückhaltung durch die Blätter.....	111
6.7.3	Interne Radionuklidkonzentration in den essbaren Pflanzenteilen nach Transport von der Blattoberfläche .....	113
6.7.4	Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden über die Wurzel.....	118
6.7.5	Aufnahme über die Wurzeln .....	139
6.8	Pfad: Unter-Glas-Kultur.....	142
6.9	Pfad: Verzehr von Milch und Fleisch von Tieren, die Futter von beregneten Weiden und Feldern erhalten haben .....	144
6.10	Pfad: Viehtränke .....	145



6.11	Pfad: orale Aufnahme von Erde.....	145
6.12	Pfad: Inhalation von Staub bei der Feldarbeit.....	146
6.13	Pfad: Inhalation von Wasserdampf.....	147
6.14	Pfad: externe Strahlenexposition.....	148
<b>7</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>150</b>
7.1	Modellrechnungen.....	150
7.2	Ergebnisse.....	151
7.2.1	Freisetzungsterm als Einheitskonzentration im Brunnenwasser.....	151
7.2.2	Sourcesterm als jährliche Freisetzung.....	164
7.2.3	Einsparung der Berechnung von Weiden.....	175
7.3	Bewertung der Ergebnisse.....	187
7.3.1	Allgemeines.....	187
7.3.2	Brunnenwasser als Teil der Geosphäre.....	188
7.3.3	Brunnenwasser als Teil der Biosphäre.....	192
<b>8</b>	<b>Empfehlungen.....</b>	<b>194</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>198</b>
9.1	Symbolverzeichnis.....	200
9.2	Literaturverzeichnis.....	210
9.3	Tabellenverzeichnis.....	221
9.4	Abbildungsverzeichnis.....	226

## **1 Einleitung**

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat die GRS über das Vorhaben SR 2337 „Sicherheit in der Nachbetriebsphase von Endlagern für radioaktive Abfälle“ (1999-2002) beauftragt, es in seiner Aufsichtstätigkeit auf dem Gebiet der Langzeitsicherheit für Endlager radioaktiver Abfälle zu unterstützen und zu beraten. In diesem Zusammenhang ist auch die Basis für die Berechnung der potentiellen Strahlenexposition des Menschen zu klären.

Die im Einzugsbereich eines Endlagers während der Nachbetriebsphase lebende Bevölkerung ist hinsichtlich ihrer Strahlenexposition ebenso schutzwürdig wie die heutige Bevölkerung, ihre Lebensumstände sind jedoch unbekannt. Ihre Strahlenexposition wird daher auf der Grundlage einer fiktiven Biosphäre berechnet, die hinsichtlich der Strahlenexposition abdeckend sein soll. Diese Biosphäre wird Referenzbiosphäre genannt.

Wesentliche Faktoren, die eine solche Biosphäre bestimmen, sind die geographische Lage des Endlagers, die Topographie des Standorts, die oberflächennahe Geosphäre einschließlich des Grundwassers, die Oberflächengewässer, das Klima, Fauna und Flora und die Verhaltensweisen des Menschen.

Endlager für radioaktive Stoffe werden so ausgelegt, dass eine Freisetzung in die Ökosphäre erst nach sehr langer Zeit erfolgen kann. In diesem Zeitraum wird sich neben anderen Randbedingungen z. B. auch das Klima ändern. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die oberflächennahe Geosphäre, die Gewässer, Fauna und Flora und mittelbar auch die Ernährungsweise des Menschen. Auswirkungen von unterschiedlichen Klimabedingungen auf die potentielle Strahlenexposition am Standort werden bei der Festlegung der Referenzbiosphäre berücksichtigt.

Zu diesem Zweck werden auf der Grundlage der klimatischen Verhältnisse im norddeutschen Raum während der letzten Million Jahre Biosphären entworfen (Kap. 3 und 4) und ihr Einfluss auf die Strahlenexposition untersucht (Kap. 5 bis 7). Als Referenzperson wird einzig der Erwachsene zugrunde gelegt, der seine Nahrungsmittel ausschließlich vom Standort bezieht. Körperbau und Stoffwechsel entsprechen den heu-

tigen Standards, die landwirtschaftlichen Methoden sind die der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Hinsichtlich der Größe der weiteren Parameterwerte zur Berechnung des Transfers von Radionukliden in die verschiedenen Kompartimente der Biosphäre, insbesondere die Nahrungsmittel, werden beste Schätzungen angestrebt.

Alle Nahrungskörbe bestehen aus Nahrungsmitteln, die unter den jeweils angenommenen Klimabedingungen erzeugt werden können und die auch heute in Europa verzehrt werden. Variationen der Nahrungskörbe betreffen die Zusammensetzung aus pflanzlichen und tierischen Bestandteilen und die Nutzung von Treibhäusern unter kalten und kühlen Klimabedingungen. Dementsprechend werden nahrungsmittelspezifische Verfahren für die Berechnung der Radionuklidkonzentration aufgestellt und angewendet. Der Verzehr von exotischen Nahrungsmitteln, für die keine Berechnungsverfahren existieren, wird nicht unterstellt.

Auf der Basis der Untersuchungsergebnisse werden Empfehlungen für die Referenzbiosphäre formuliert (Kap. 8).

## 2 Das Grundszenario

Ein Biosphärensystem für die Begutachtung von Endlagern ist eine Sammlung von Annahmen und Hypothesen, die zur Erstellung einer konsistenten Basis für die Berechnung der Strahlenbelastung in Folge von Freisetzungen von Radionukliden aus dem Endlager notwendig sind /BIO 99a/. Zur Erstellung einer Referenzbiosphäre sind folgende Schritte notwendig:

- Definition des Kontextes für die Anwendung
- Identifikation und Rechtfertigung der relevanten Biosphäre(n) sowie detaillierte Beschreibung der identifizierten Biosphäre(n)
- Aufstellung von plausiblen Hypothesen über das Verhalten der potentiellen Expositionsgruppen
- Modellierung von konsistenten Expositionspfaden für die gewählten Expositionsgruppen
- Zusammenstellung der Parameterwerte

Komponenten der Referenzbiosphäre sind:

- Lage und die Ausdehnung des Endlagers
- Topographie des Standorts
- Eigenschaften der oberflächennahen Geosphäre und der Gewässer
- Klima
- Flora und Fauna
- Verhaltensweisen des Menschen

Diese Komponenten beeinflussen einander, wie Tabelle 2.1 zeigt. Ein Plus deutet das grundsätzliche Bestehen eines Einflusses an, wobei offen gelassen wird, ob dieser Einfluss im Kontext der Nachbetriebsphase eines Endlagers beachtenswert ist. So wirkt das Klima langfristig auf die geologischen Verhältnisse ein, z. B. bei der Bildung von Salzdomen, und gleichzeitig übt die Geologie über den Vulkanismus einen Einfluss auf das Klima aus.

**Tab. 2.1:** Komponenten der Biosphäre

Klima	+	+	+	+	+	+
+	Geologie	+	+	+	+	+
+	+	Topogra- phie	+	+	+	+
+	+	+	Gewässer	+	+	+
+	-	+	+	Boden	+	+
+	+	+	+	+	Flora und Fauna	+
+	+	+	+	+	+	Menschen

Einige der Komponenten des Referenzökosystems werden a priori festgelegt, andere a posteriori. Festlegungen a priori werden teilweise durch die Gegebenheiten in der Umgebung der in Deutschland derzeit in Aussicht genommenen Endlagerstandorte begründet, teilweise erfolgen sie aus Konservativitäts- oder aus Praktikabilitätsgründen.

Die in Deutschland vorgegebenen Verhältnisse sind: Das Endlager liegt nicht oberflächennah, sondern in tiefen geologischen Schichten. Es liegt nicht an der Küste, sondern im Binnenland. Es liegt nicht im Hochgebirge, sondern in ebenen oder hügeligen Gegenden.

Einige wenige konservative a-priori-Annahmen werden getroffen, damit die Nachweisführung, das eine bestimmte Höhe der Strahlenexposition nicht überschritten wird, gelingen kann: Konservativ ist die Festlegung des Eintritts der Radionuklide in die Ökosphäre über einen Brunnen. Hiervon hängen die Pfade, auf denen die Radionuklide in die einzelnen Umweltmedien (Boden, Brunnenwasser, Flusswasser, Pflanzen und Tiere) gelangen, und dementsprechend auch die relative Bedeutung der einzelnen Expositionspfade, wesentlich ab.

Alternative Freisetzungstellen könnten z. B. eine Quelle oder der Boden sein. Die direkte Nutzung einer Quelle entspricht der Nutzung eines tiefen Brunnens, nur ist Quellwasser durch Oberflächenwasser (Regen) stärker verdünnt, die Radionuklidkonzentration bei gleicher Freisetzungsrates daher geringer. Aufwallendes Grundwasser in einem Feuchtgebiet führt zu einer Einschränkung der landwirtschaftlichen Nutzbarkeit und auf diesem Wege zu einer geringeren Strahlenexposition über die Nahrung und auch über die  $\gamma$ -Strahlung vom Boden, denn ein lange währender Aufenthalt im Feuchtgebiet ist wenig plausibel. Auf den exakten Nachweis, dass die potentielle

Strahlenexposition im Brunnenszenario höher ist als bei einer Freisetzung über andere Wege, wird verzichtet.

Eine konservative a-priori-Annahme ist die Annahme, dass am Standort eine kleine dörfliche Gemeinschaft lebt, die alle benötigten Nahrungsmittel selbst erzeugt. Die wahren Verhältnisse werden zwischen dieser Situation und einer Situation, in der die gesamte Nahrung aus anderen Landstrichen importiert wird, liegen. Es wird willkürlich angenommen, dass diese dörfliche Gemeinschaft 20 Personen umfasst.

Die Forderung der ICRP /ICRP 98/ nach einer „kritischen Gruppe“ wird erfüllt. Die kritische Gruppe umfasst die Personen, die auf Grund ihres Wohnorts, ihrer Nahrung und ihrer sonstigen Lebensumstände zu den höchst exponierten Menschen gehören /ICRP 85b/. Nach ICRP 43 /ICRP 85a/ soll die Größe der kritischen Gruppe im Bereich von maximal einigen Dutzend Menschen liegen. Zu dieser Gruppe gehört auch das Individuum, dessen Strahlenexposition unter konservativen, aber noch vernünftigen Gesichtspunkten berechnet wird, das ist das „Reasonably Maximally Exposed Individual“ (RMEI) /ICRP 85b/.

Aus Praktikabilitätsgründen wird folgende Randbedingung a priori festgelegt: Der zu untersuchende Zeitraum betrage 1 Mio. Jahre. Dieser Zeitraum reicht aus für einen deutlichen Zerfall der eingelagerten Radionuklide. Mit dieser Festlegung verbunden sind drei weitere a-priori-Annahmen, die der Vereinfachung der Analysen dienen:

1. Körperbau und Stoffwechsel des Menschen entsprechen den Festlegungen in ICRP 23 /ICRP 74/. Diese Festlegung hat zur Folge, dass die Dosisfaktoren als unveränderbar betrachtet werden.
2. Die kulturellen Errungenschaften der nächsten Million Jahre üben keinen Einfluss auf die Biosphäre aus, auch die Lebensweise des Menschen verändert sich nicht. Tatsächlich ist der Einfluss des Menschen auf die Biosphäre hoch, und seine Lebensweise hat sich im Laufe der letzten Million Jahre von der Kulturstufe der Altsteinzeit bis zur heutigen Lebensweise fortentwickelt. Die weitere Entwicklung ist nicht vorhersehbar.
3. Die Technologie orientiert sich am Stand von Wissenschaft und Technik im letzten Viertel des 20. Jahrhunderts. Dies betrifft insbesondere die Art der Nahrungsbeschaffung. Diese Annahme ist zwar nicht konsistent mit der Forderung, dass am Standort eine kleine bäuerliche Siedlung besteht, die keinen

am Standort eine kleine bäuerliche Siedlung besteht, die keinen Austausch von Nahrungsmitteln mit anderen Bevölkerungsgruppen pflegt, doch wird die Inkonsistenz hingenommen, da andernfalls die kritische Gruppe nicht das RMEI (Reasonably Maximally Exposed Individual) enthalten könnte.

Weitere a-priori-Annahmen werden nicht getroffen. Bei der Festlegung der weiteren Parameterwerte wird folgendermaßen verfahren:

- Zunächst werden die Klimabedingungen und die Konsequenzen für die Biosphäre allgemein,
- dann die Lebensbedingungen des RMEI (Reasonably Maximally Exposed Individual) beschrieben.

Zur Identifizierung dieses Individuums werden mehrere unterschiedliche Nahrungskörbe, die sich in der Hauptsache durch den Grad der Nutzung von tierischem Eiweiß unterscheiden, zusammengestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass nur solche Nahrungsmittel verzehrt werden, die auch heute in Gebieten mit hohem Lebensstandard genutzt werden. Diese Annahme ist nicht realistisch, da der Fortschritt nicht antizipiert wird, außerdem wird es in Zeiten eines Klimawechsels zu wirtschaftlicher Not kommen, die den Einsatz von exotischen Nahrungsmitteln (Würmer, Heuschrecken und ähnliches) nötig machen können, wie es auch in der Vergangenheit vielfältig geschehen ist. Im übrigen gelten Weinbergschnecken und Froschschenkel in Europa, Würmer und Heuschrecken in Südostasien als Delikatesse. Jedoch liegen keine allgemein anerkannten Grundlagen für die Berechnung der Radionuklidkonzentration in solchen Nahrungsmitteln vor, und es ist auch nicht Ziel der vorliegenden Arbeit, diese zu erstellen.

Im nächsten Schritt werden die Formeln für die Berechnung der Strahlenexposition aufgestellt. Wenngleich für viele Radionuklide der Ingestionspfad am wichtigsten ist, gibt es doch auch Radionuklide, die hauptsächlich durch Inhalation und durch Aufenthalt im Bereich kontaminierter Gebiete eine Strahlenexposition verursachen. Bei der Modellierung werden auch diese Pfade beachtet. Sodann werden die benötigten Parameterwerte aufgelistet, quantitativ festgelegt und protokolliert.

Diese Vorgehensweise orientiert sich am in /BIO 99b/ empfohlenen Schema für die Zusammenstellung einer Referenzbiosphäre. Sie liefert die notwendigen Erkenntnisse

für die Erstellung einer Grundlage zur Berechnung der individuellen Strahlenexposition während der Nachbetriebsphase eines Endlagers.

Darüber hinaus werden bei dieser Vorgehensweise Daten bereitgestellt, die zur Berechnung der Kollektivdosis notwendig sind. Die Berechnung von Individual- und Kollektivdosen ist auf der Grundlage dieser Daten außerdem auch dann möglich, wenn als Eingangsgröße nur die jährliche Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre, aber nicht die Radionuklidkonzentration im Wasser bereit steht. In diesem Fall ist die Festlegung der Größe der Dorfgemeinschaft relevant, ebenso die Menge des unter den verschiedenen Klima- und Ernährungsvarianten gefördert Grundwassers.

Zum Zweck der Bestimmung der Kollektivdosis wird der Ressourcenverbrauch unter den verschiedenen Klimabedingungen und unter Berücksichtigung der Ernährungsvarianten ermittelt, denn die Größe des für die Ernährung der kritischen Gruppe notwendigen Landes erlaubt die Schätzung der Größe der Population, die sich auf der Grundlage des vom Endlager beeinflussten Gebietes ernähren kann.



## **3 Mögliche Klimaszenarien**

### **3.1 Definition**

Die Weltmeteorologische Organisation hat den Begriff „Klima“ wie folgt definiert (zitiert nach /SCH 94/): „Klima ist die Synthese des Wettergeschehens über ein Zeitintervall, das im wesentlichen lang genug ist, um die Festlegung der statistischen Ensemble-Charakteristika (Mittelwerte, Varianzen, Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse usw.) zu ermöglichen und das weitgehend unabhängig bezüglich irgendwelcher augenblicklicher Zustände ist.“

Klimaelemente sind u. a. Lufttemperatur, Niederschlagshöhe und -Intensität, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, mittlere Verdunstung, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Sichtweite, Sonnenscheindauer, Schneedeckenhöhe, Dauer der Schneebedeckung und Erdbodenzustand (trocken, nass, gefroren) /SCH 94/. Bei allen diesen Merkmalen werden auch der Tages- und Jahresgang berücksichtigt, außerdem die normalen und die extremen Schwankungen.

Die Benennung der unterschiedlichen Klimabedingungen erfolgt mit Hilfe von Indizes, die in der Hauptsache auf dem Jahresgang der Temperatur und der Niederschläge beruhen. Dies erlaubt die Identifizierung verschiedener Klimagürtel, die Vergleichsbildung zwischen ihnen und die Kartierung. Bei der weiteren Klassifikation der Klimasituationen nach Köppen und Geiger wird die klimatypische Vegetation herangezogen. So werden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Klimagürtel und Klimagebiete unterschieden (zitiert nach /SCH 94/). Diese Klimagebiete werden an Hand des Jahres- und Tagesganges der Temperatur und des Jahresganges der Niederschläge weiter aufgeschlüsselt. Andere Autoren klassifizieren das Klima anders. Beispielsweise nutzt Trewartha nur die thermischen Unterschiede, während Troll und Paffen an Hand von Temperatur, Feuchtigkeit und der natürlichen Vegetation 36 Klimatypen definieren /HEN 97/. Das einfachere System von Köppen und Geiger erscheint für die Zwecke dieses Berichts als ausreichend.

Die Klassifikation des Klimas ist rein beschreibender Natur; es ist nicht Aufgabe der Klassifikation, zu erklären, warum zu einer gegebenen Zeit an einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche ein bestimmtes Klima herrscht. Dementsprechend liefert die

Klassifikation auch keine Aussage darüber, welche Klimabedingungen zu irgendeiner zukünftigen Zeit an einem bestimmten Standort theoretisch auftreten können.

**Tab. 3.1** Klimagürtel und Klimagebiete nach der Köppen-Geiger-Klassifikation

Klimagürtel		Klimagebiete	
A	Tropisches Regenklima Mmin* > 18°C	Af	Tropisches Regenwaldklima
		Aw	Savannenklima
B	Trockenklima (besondere Definition)	BS	Steppenklima
		BW	Wüstenklima
C	Warmgemäßigtes Regenklima -3 °C < Mmin* > 18 °C	Cs	Etesienklima (sommertrocken)
		Cf	Feuchtgemäßigtes Klimate
		Cw	Sinisches Klimate (wintertrocken)
D	Schneewaldklimate, Nordhemisphäre Mmin* < -3 °C, Mmax* > 10 °C	Df	Feuchtwinterkaltes Klimate
		Dw	Transbaikalisches Klimate (wintertrocken)
E	Schneeklimate	ET	Tundrenklimate
		EF	Klimate des ewigen Frostes

\* Mmin, Mmax = minimaler und maximaler Monatsmittelwert der bodennahen Lufttemperatur

### 3.2 Potentielle Klimasituationen an einem deutschen Endlagerstandort

Die zur Zeit in Deutschland diskutierten Endlagerstandorte liegen nahe beieinander im gleichen Klimategebiet. Daher gelten die nachfolgenden Ausführungen für alle potentiellen Endlagerstandorte. Die Beschränkung des Betrachtungszeitraums auf 1 Million Jahre führt zu einer Begrenzung der Zahl der möglichen Klimasituationen.

Das zu einer gegebenen Zeit herrschende globale Klimate wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, z. B. durch den Abstand zwischen Erde und Sonne, die Exzentrizität der Erdumlaufbahn und die Neigung der Erdachse, die Sonnenaktivität, Vulkanismus und Meteoriteneinschlag, die Verteilung der Meeres- und Landmassen, durch anthropogene Faktoren wie die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre und viele andere mehr. Das an einem definierten Punkt des Festlands zu einem gegebenen Zeitpunkt herrschende Klimate wird zusätzlich bestimmt durch seine geographische Lage, insbesondere den Breitengrad und die orographische Situation, die Entfernung und Richtung des nächstgelegenen Meeres und seine Temperatur, außerdem durch die Aktivitäten des Menschen wie z. B. die lokale Zerstörung der Vegetation.

Die geographische Lage ändert sich nur in sehr langen Zeiträumen durch die Kontinentaldrift; in Zukunft wahrscheinlich auftretende Änderungen sind nach /SCH 94/ eine Trennung des amerikanischen Doppelkontinentes mit starken Auswirkungen auf die Meeresströmungen sowie eine Schrumpfung des Mittelmeeres auf Grund der Nordverschiebung von Afrika mit Folgen für die typische Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete. Jedoch sollen bis zu diesen Ereignissen etwa 50 Mio. Jahre vergehen, das ist ein Zeitraum weit außerhalb des zu betrachtenden Zeitraums von 1 Mio. Jahren. Daher werden die Auswirkungen von Kontinentalverschiebungen außer Acht gelassen.

Auf Grund der geographischen Lage werden somit selbst im Fall, dass das globale Klima Extremwerte annimmt, nicht alle theoretisch denkbaren Klimasituationen an einer bestimmten Stelle der Erde möglich sein. Da der deutsche Endlagerstandort im betrachteten Zeitraum von ca. 1 Mio. Jahren weiterhin etwa zwischen dem 50. und 55. Grad nördlicher Breite liegen wird, können tropische Klimasituationen ausgeschlossen werden. Die Entfernung zum Meer wird sich nicht wesentlich verändern, doch ist ein kaltes arides Klima nicht ausgeschlossen, wenn der Golfstrom seine Lage ändert. Die in Tabelle 3.2 angegebenen Klimasituationen werden vermutlich zeitweise auftreten.

**Tab. 3.2** Mögliche Klimasituationen (Köppen-Geiger-Klassifikation) am Standort

Klimagürtel		Klimagebiete		Beispiele für das Auftreten /HEN 97, HUI 97, SCH 94/
C	Warmgemäßigtes Regenklima $-3^{\circ}\text{C} < M_{\text{min}} >$ $18^{\circ}\text{C}$	Cs	Etesienklima (som- mertrocken)	Vor 4000 bis 7000 Jahren nahe- zu erreicht
		Cf	Feuchtgemäßigtes Klima	z. B. zur Zeit
D	Schneewaldklima, Nordhemisphäre $M_{\text{min}} < -3^{\circ}\text{C}$ , $M_{\text{max}} > 10^{\circ}\text{C}$	Df	Feuchtwinterkaltes Klima	z. B. vor 11 000 bis 12 000 Jahren
		D w	Transbaikalisches Klima (wintertrocken)	z. B. vor 10 000 bis 11 000 Jahren
E	Schneeklima	ET	Tundrenklima	z. B. vor ca. 15 000 bis 20 000 Jahren
		EF	Klima des ewigen Frostes	Vor 130 000 bis 400 000 Jahren mehrfach Jahrtausende lang

\*  $M_{\text{min}}$ ,  $M_{\text{max}}$  = minimaler und maximaler Monatsmittelwert der bodennahen Lufttemperatur

Die historischen Angaben sind nur als ungefähre Beispiele zu verstehen; tatsächlich ändert sich das Klima ständig, und auch innerhalb der Eiszeiten sind relativ warme und innerhalb der Zwischeneiszeiten relativ kalte Zeitabschnitte aufgetreten /SCH 94/.

Die folgenden Angaben nach /HEN 97, SCH 94/ sollen zur näheren Charakterisierung der Extremwerte des historischen Klimas dienen: Während des nacheiszeitlichen Klimaoptimums vor 4 000 bis 7 000 Jahren lagen die mittleren Jahrestemperaturen in der Nordhemisphäre um 1 K höher als heute und während der kältesten Periode der Würmeiszeit vor etwa 18 000 Jahren 4 bis 5 K unter den heutigen Temperaturen /SCH 94/. Die Abweichung der mittleren Lufttemperatur des wärmsten Monats betrug für Norddeutschland vor 18 000 Jahren etwa -12 K und vor 6000 Jahren etwa +2 K /HEN 97/. Die jährlichen Niederschläge sollen in Europa während der Kaltzeit um 300 mm unter den heutigen gelegen haben /SCH 94/. Auch während des Klimaoptimums müssen zumindest im Sommer geringere Niederschläge als heute gefallen sein. Diese Erkenntnisse beruhen auf der Pollenanalyse. /HEN 97/ gibt an, dass der jährliche Niederschlag in Niedersachsen geringfügig hinter dem heutigen zurückblieb, während weiter östlich deutlich weniger Niederschlag fiel.

Ein wichtiger Faktor für die Ausprägung der lokalen Biosphäre ist die orographische Lage. Es wird davon ausgegangen, dass die in Deutschland diskutierten Endlagerstandorte auch in der nächsten Million Jahre in einem ebenen bis hügeligen Gelände im Binnenland und in geringer Höhe über dem Meeresspiegel liegen werden. Dabei kann die Entfernung zur Nordsee, bedingt durch ein Absinken der norddeutschen Tiefebene, geringer oder, bedingt durch das Sinken des Meeresspiegels in Folge einer Kaltzeit, größer als heute werden. Veränderungen der Landschaftsform sind durch Moränenbildung in Folge einer Eiszeit möglich, ebenso durch Starkniederschläge, aber keinesfalls wird der Standort in ein Gebirge umgewandelt. Daher bleiben alle gebirgstypischen Ausprägungen von Klima, Boden und landwirtschaftlicher Nutzung in den folgenden Abschnitten unberücksichtigt.

## **4 Biosphären unter ausgewählten Klimasituationen**

### **4.1 Vorbemerkung**

In diesem Abschnitt werden die Biosphären beschrieben, die sich unter den verschiedenen Klimabedingungen (vgl. Tabelle 3.2) ausprägen können. Dabei werden die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Klima, Gewässern, Boden und Flora und Fauna (vg. Tabelle 2.1) beachtet.

Zunächst werden Angaben über den Jahresgang von Temperatur und Niederschlag an Hand von Wetterstationen mit vergleichbaren Klimabedingungen gemacht, dann folgt eine Beschreibung der natürlichen Umwelt, insbesondere der Vegetation, des Bodens und der Oberflächengewässer.

Die natürlichen Bedingungen würden unter vielen Klimabedingungen nur eine geringe Bevölkerungsdichte zulassen, denn die Vegetationsperiode kann auf Grund von Kälte oder Trockenheit stark eingeschränkt sein, so dass die Primärproduktionsrate gering ist, aber der Mensch tendiert dazu, seine Umwelt mit dem Ziel einer höheren Produktionsrate zu verändern. Unter den Gesichtspunkten der Radioökologie ist dabei besonders relevant, dass der Mensch Defizite in der Wasserversorgung durch künstliche Bewässerung ausgleicht, denn dies ist in einer Agrargesellschaft der wichtigste Antrieb für die Einbringung von Grundwasser in die Biosphäre. Ferner verändert der Mensch den Boden durch mechanische Bearbeitung und Düngung, und er bringt standortfremde Nutztiere und Pflanzen ein. Diese gedeihen unter kalten Klimabedingungen nur im Treibhaus. Unter radioökologischen Gesichtspunkten sind Treibhäuser deshalb relevant, weil die Beregnungsrate höher als im Freiland sein muss, da der natürliche Niederschlag fehlt, außerdem kann der Luftaustausch mit dem Freiland gezielt eingeschränkt werden.

Das Verhalten künftiger Generationen kann nicht vorausgesagt werden. Daher werden unter allen untersuchten Klimabedingungen mehrere Methoden der Nahrungsmittelproduktion beschrieben. In die radioökologischen Berechnungen gehen folgende Größen ein:

- ◆ Die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Nahrungsmittel
- ◆ Die Berechnungsraten (jährlicher Bedarf und Länge der Berechnungsperiode)
- ◆ Die Erträge
- ◆ Angaben zu Fütterung und Tränke der Nutztiere

Die Größe der benötigten Flächen und die zu fördernden Wassermengen ergeben sich aus den Angaben über Erträge und Berechnungsnotwendigkeiten. Sie werden hauptsächlich ermittelt, um Plausibilitätsbetrachtungen anzustellen. Es zeigt sich z. B., dass es unmöglich ist, die Rentierherde (siehe Abschnitt 4.3) ganzjährig im vom Endlager beeinflussten Gebiet zu halten. Die Größen der Ackerflächen gehen (neben anderen Variablen) in die Berechnung der Zeit ein, in der ein Bauer besonders hohen Staubkonzentrationen ausgesetzt sein kann.

In den meisten Fällen führen die Angaben über Landnutzung und Wasserverbrauch nicht zu Begrenzungen in den radioökologischen Berechnungen. Sie haben aber eine Bedeutung für die Berechnung von Kollektivdosen und für die Berechnung der Strahlenexposition auf der Grundlage von jährlichen Freisetzungsraten der Radionuklide in die Biosphäre.

## 4.2 Klima des ewigen Frostes (EF)

Dieses Klima herrscht derzeit in der Antarktis und in Innergrönland. Es zeichnet sich durch extrem tiefe Temperaturen im Winter und mittlere monatliche Sommertemperaturen unter dem Gefrierpunkt aus. Besonders in der Nähe von Gebirgen ist mit häufigen schweren Stürmen zu rechnen.

Kleinräumige eisfreie Gebiete stehen mit den Stürmen in Zusammenhang und kommen insbesondere in den Gebirgen vor, außerdem in der Nähe der antarktischen Küsten. Pflanzen werden nur vereinzelt angetroffen.

Freisetzungen von Radionukliden aus einem Endlager sind in diesem Klimaszenario nicht zu erwarten, da das Wasser nicht im flüssigen, sondern im gefrorenem Zustand vorliegt. Im übrigen sind die Bedingungen dieses Klimas wenig geeignet für einen dauerhaften Aufenthalt eines Menschen, der sich von Nahrungsmitteln, die am Standort erzeugt wurden, ernährt.

Dieses Klima ist daher nicht relevant für die potentielle Strahlenexposition des Menschen während dieses Klimas. Es hat aber Auswirkungen auf die Exposition in späteren Zeiten, da durch Gletscherbildung Veränderungen der orographischen Situation möglich sind. Es kann zu einem Abschleifen des Deckgebirges über dem Endlager kommen mit Auswirkungen auf den Zeitpunkt der Freisetzungen und die Radionuklidkonzentration bei Eintritt in die Biosphäre, außerdem kann die Erdoberfläche durch Moränenbildung überformt werden; dies würde wegen der größeren Erosion in geneigtem Gelände Auswirkungen auf die Verweilzeit der Radionuklide im Boden haben. Solche Einflüsse sind indes nicht Gegenstand der vorliegenden Abhandlung.

### 4.3 Tundrenklima (ET )

#### 4.3.1 Klimatische Situation

Das Tundrenklima (ET) herrscht heute rund um die Arktis vor. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt weniger als  $-3^{\circ}\text{C}$ , wobei die mittlere Temperatur im wärmsten Monat zwischen  $6$  und  $12^{\circ}\text{C}$ , im kältesten Monat unter  $-8^{\circ}\text{C}$  liegt. Die Niederschläge sind gering, aber auf Grund der geringen Evaporation ist das Klima trotzdem humid. Die Vegetationszeit, das ist die Zeit mit einer Mitteltemperatur über  $10^{\circ}\text{C}$ , ist kürzer als 30 Tage.

Beispiele für den Jahresgang von Niederschlägen und monatlicher Mitteltemperatur werden in den Abbildungen 4.1 (Isfjord, Spitzbergen nach Angaben in /SCH 94/) und 4.2 (Stykkisholmur in Island nach Angaben in /UKA 98/) gegeben. Isfjord mit einer mittleren Julitemperatur von  $4.5^{\circ}\text{C}$  liegt klimatisch gesehen an der Grenze zwischen Tundra und Kältewüste, Stykkisholmur ist in einer hochatlantischen Graslandtundra an der Grenze zwischen Tundra und kaltgemäßigtem Klima gelegen. Auf Grund der atlantischen Lage fehlen hier die extremen winterlichen Temperaturen und der eigentlich für Tundren typische Permafrostboden tritt nicht auf.

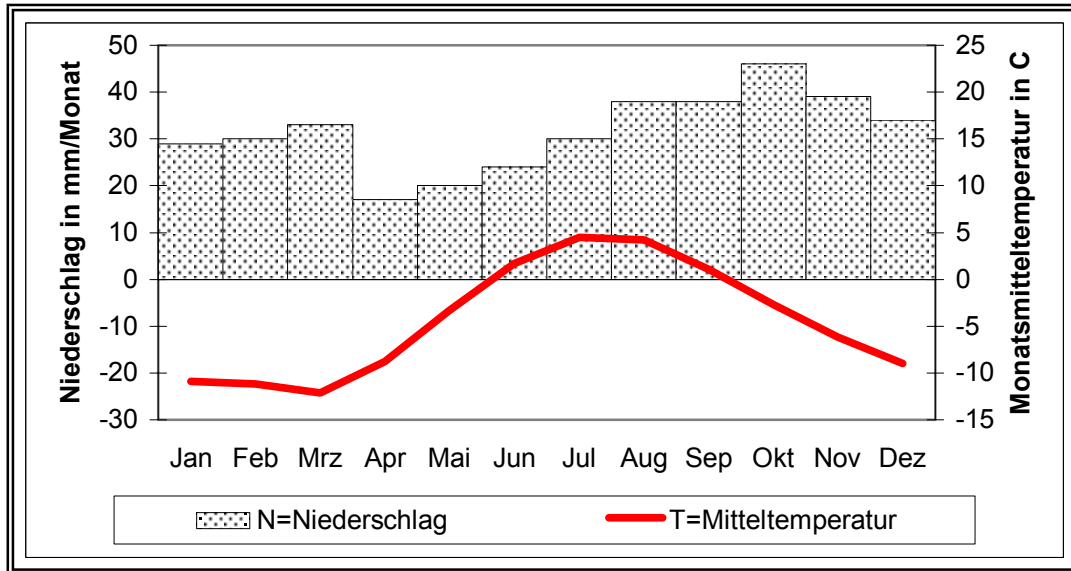
Eine direkte Übertragung der heutigen Verhältnisse bei Isfjord und Stykkisholmur auf eiszeitliche Verhältnisse im heutigen Norddeutschland ist allerdings nicht möglich; in Isfjord auf  $78^{\circ}$  nördlicher Breite ist der Winkel der Sonneneinstrahlung wesentlich flacher als bei  $52^{\circ}$  nördlicher Breite, daher dauert die für die Photosynthese wichtige Helligkeitsphase im Sommer wesentlich länger als in Norddeutschland. Stykkisholmur liegt zwar auf  $65^{\circ}$  nördlicher Breite, womit die Lichtverhältnisse während einer Eiszeit in Norddeutschland schon zutreffender abgebildet werden, aber der Standort ist hochatlantisch; der warme Golfstrom wirkt ausgleichend auf die Temperatur und erhöhend auf die Niederschläge – die Unterschiede zwischen dem wärmsten ( $10^{\circ}\text{C}$ ) und dem kältesten ( $-1.8^{\circ}\text{C}$ ) Monat sind geringer und die Niederschläge ergiebiger (693 mm) als sie unter eiszeitlichen Bedingungen in Norddeutschland sein würden.

Die Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager ist über zwei Wege, nämlich eine Quelle oder einen Brunnen, möglich. Dabei können Brunnen und Quelle in einem atlantischen Klima wie in Stykkisholmur ganzjährig zur Verfügung stehen, während in

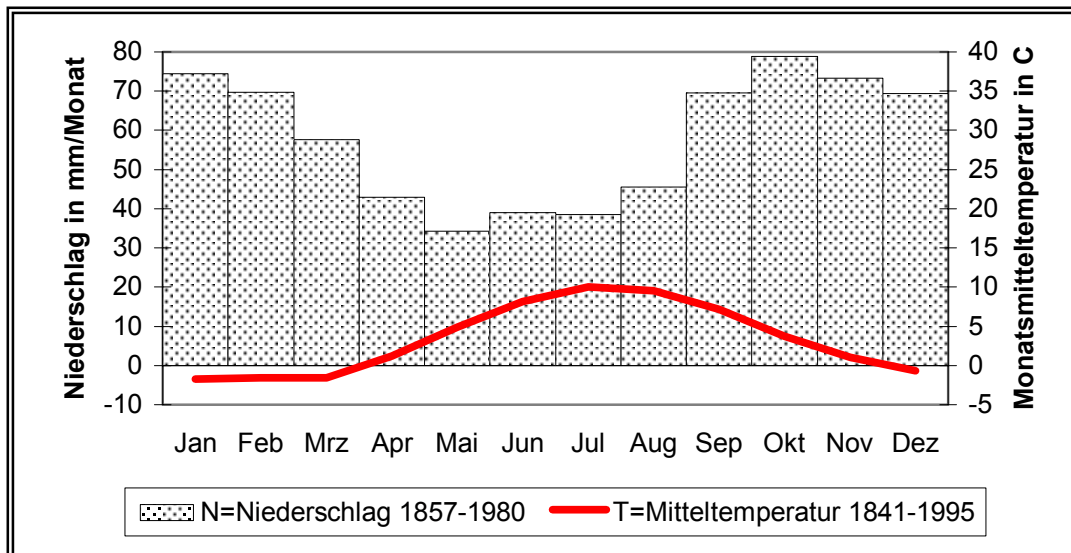


einem Klima wie in Spitzbergen sowohl die winterliche Kälte als auch der Permafrostboden die Wasserführung beeinträchtigen dürfte.

**Abb. 4.1** Klimadiagramm für eine Tundra: Isfjord, Spitzbergen (23 Jahre)



**Abb. 4.2** Klimadiagramm für eine hochatlantische Tundra: Stykkisholmur, Island



#### 4.3.2 Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna

Die Bodenbildung hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab: Klima, Relief, Ausgangsgestein, Vegetation, Tierwelt, Zuschusswasser aus dem Untergrund, Hangneigung und Aktivitäten des Menschen. Wie weit sich ein klimatypischer Boden ausbilden kann, hängt außerdem von der zur Verfügung stehenden Zeit ab /HEN 97/. Da eingeschätzt wird, dass dem Pflanzenkleid ein höherer Einfluss als dem Ausgangsgestein zukommt, folgen zunächst Angaben über die Vegetation.

Die Tundra ist gekennzeichnet durch das Fehlen von Bäumen. Dies beruht auf der kurzen Vegetationszeit (unter 30 Tage) und auf dem Permafrostboden, denn Bäume brauchen während der Wachstumsperiode einen aufgetauten Boden von mindestens 1 m Tiefe /MÜL 81/. Krautige Pflanzen haben bessere Wachstumsbedingungen; ihre Wurzeln sind meistens kürzer und liegen daher in wärmeren Bodenschichten. Auf Grund ihrer Atmung kann die Bodentemperatur im Nahbereich der Pflanzen deutlich höher sein als die Lufttemperatur, so dass der Boden bereits oberflächlich aufgetaut ist, wenn die mittlere Lufttemperatur den Gefrierpunkt erreicht /WAL 70/.

Im Grenzgebiet zur Kältewüste kommen keine einjährigen Pflanzen vor, da sie nicht schnell genug zur Samenreife gelangen können; Kräuter werden hier bis zu 100 Jahre alt, Zwergsträucher bis 500 Jahre. Bei längerer Vegetationszeit bilden sich subpolare Wiesen mit sommergrünen Gesträuchen aus /MÜL 81/. Charakteristisch ist das Auftreten der Rentierflechte auf trockenen Standorten /WAL 70/. Die Nettoprimärproduktion ist entsprechend der kurzen Vegetationszeit sehr gering und beträgt nach /MÜL 81/ zwischen 0.5 bis 1 t/ha, nach /SCH 94/ zwischen 0.1 und 4 t/ha. Tabelle 4.1 nach /WAL 70/ vermittelt eine Vorstellung über die gesamte oberirdische Phytomasse und die jährliche Primärproduktion.

**Tab. 4.1** Angaben zur Phytomasse und Primärproduktion in der Tundra /WAL 70/

Klimatyp (Vegetationszone)	Oberirdische Phytomasse in kg/m <sup>2</sup> *	Primäre Produktion in kg/(m <sup>2</sup> a) *
Nördliche Tundra (Polsterpflanzen)	0.06	0.04
Mittlere Tundra (krautreich)	0.12	0.07
Südliche Tundra (Zwergsträucher)	0.32	0.12
Waldtundra (mit Birke und Fichte)	0.73	0.14

\* die Angaben beziehen sich auf die Trockenmasse

Ackerbau führt unter solchen Bedingungen zu rascher Bodenzerstörung, aber eine Nutzung als Weidegebiet ist möglich. Rentiere ernähren sich etwa zur Hälfte von Rentierflechten, die nur auf trockenen hochwasserfreien Böden vorkommen /WAL 70/; weitere Nahrungsbestandteile sind Blätter der Birken und Weiden sowie Gräser und Kräuter /GRZ 68/, außerdem Pilze und Beeren. Auf Grund der geringen Primärproduktion in der Tundra benötigen sie sehr ausgedehnte Weidegebiete; sie leben daher nomadisch und suchen im Winter südliche, im Sommer nördliche Gebiete auf /MÜL 81/.

Die klimatischen Verhältnisse in einer Tundra erlauben keine intensive Bodenbildung. Im Grenzgebiet zur Kältewüste treten Rohböden auf, die durch Kryoturbation langsam umgeschichtet werden. In Hanglagen gleitet der durchnässte Oberboden auf dem festen Permafrostboden talwärts (Solifluktion). Permafrostböden behindern das Versickern des Schmelzwassers, wodurch Versumpfung eintritt, außerdem ergeben sich in der Tiefe reduzierende Bedingungen. Bei besserer Durchlüftung der oberflächennahen Bodenschichten können Tundragleye entstehen. In wärmeren Gebieten treten Podsolböden geringer Mächtigkeit (Nanopodsole), Tundragleyeböden und Gleypodsole auf. Im Gebiet atlantischer Heiden findet in Senken auch Moorbildung statt, in anderen Teilen der Tundra reichen die Temperaturen hierfür nicht aus. Trotz der schüttereren Pflanzendecke ist der organische Anteil an den Tundraböden hoch, denn die tiefen Temperaturen behindern nicht nur das Wachstum sondern auch die Zersetzung der Pflanzen /HEN 97, MÜL 81, WAL 70/. Auf Grund des verzögerten Abbaus der organischen Substanz versauert der Boden tendenziell.

Während der Entstehungszeit einer Tundra weichen die Bodenverhältnisse von den oben geschilderten ab. Das Klima vor der Klimaänderung ist dann ein wesentlicher Einflussfaktor. Wenn vorher ein Klima des ewigen Frostes geherrscht hat, existiert zunächst überhaupt kein Boden, sondern er bildet sich erst mit der Zeit. Herrschte vorher ein wärmeres Klima, so wird anfangs der viel mächtigere Boden des wärmeren Klimas vorliegen, der allmählich umgeschichtet wird (Kryoturbation), wodurch sich die Grenzen zwischen den Horizonten verwischen; gleichzeitig wird durch Erosion die Mächtigkeit des Bodens verringert, bis sich schließlich Gleichgewichtsbedingungen zwischen Neuentstehung und Abtragung des Bodens einstellen.

### 4.3.3 Gewinnung der Nahrungsmittel

Die kritische Gruppe für das Tundrenszenario ist eine Gruppe von Rentierzüchtern. Außer Rentierfleisch und Milch wird auch Fisch genutzt, zusätzlich werden in der südlichen Tundra Beeren und Pilze gesammelt. Als Variante wird angenommen, dass pflanzliche Nahrungsmittel in Treibhäusern erzeugt werden. Da es kaum vorstellbar ist, dass eine Bevölkerungsgruppe völlig auf den Konsum von Rentiermilch verzichtet, basiert auch diese Ernährungsvariante überwiegend auf tierischem Eiweiß.

In Tabelle 4.2 werden die Nahrungskörbe für beide Ernährungsweisen zusammengestellt. Angestrebt wird eine tägliche Energiezufuhr von 3000 kcal., wobei die Aufnahme von Fett und Eiweiß unter den Lebensbedingungen in der Tundra höher als sonst üblich ist.

Die Angaben über die Zusammensetzung der Nahrung sind nach /SOU 81/ zitiert, nur die Zusammensetzung der Rentiermilch wurde aus /GRZ 68/ übernommen. Alle Angaben beziehen sich auf den Inhalt im essbaren Anteil, die Energie auf den verdaulichen Teil. Kohlehydrate verstehen sich ohne Rohfaseranteil.

**Tab. 4.2** Nahrungskörbe in der Tundra

		Wasser	Beeren	Pilze	Kartoffeln	Obst	Feldsalat	Milch	Fleisch	Fisch	Summe
Abfall	Anteil	0	0,06	0,2	0,2	0,08	0,03	0	0,2	0,48	
Wasser	%	100	87,40	88,60	77,80	85,30	93,40	63,30	74,70	76,30	
Energie	kcal./100 g	0	41,0	34,0	81,2	49,9	17,7	234,7	118,1	207,4	
Fett	%	0	0,53	0,40	0,11	0,40	0,36	22,50	3,34	2,73	
Eiweiß	%	0	0,28	2,77	2,05	0,34	1,84	10,30	20,60	19,50	
Kohlehydrate	Anteil	0	9,90	4,84	18,50	12,60	2,85	2,50	0,00	0,00	
<b>normale Ernährung</b>	Verbrauch in kg/a	<b>700</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>310</b>	<b>160</b>	<b>70</b>	
Energie	kcal/d	0	56,2	37,2	0,0	0,0	0,0	1992,2	517,2	397,5	3000
Fett	g/d	0	0,73	0,44	0,00	0,00	0,00	190,97	14,63	5,23	212
Eiweiß	g/d	0	0,38	3,03	0,00	0,00	0,00	87,42	90,24	37,37	218
<b>Dorf mit Treibhäusern</b>	Verbrauch in kg/a	<b>700</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>220</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>240</b>	<b>100</b>	<b>70</b>	
Energie	kcal/d	0	56,2	37,2	489,1	122,8	29,0	1542,4	323,2	397,5	2997
Fett	g/d	0	0,73	0,44	0,66	0,99	0,59	147,84	9,14	5,23	166
Eiweiß	g/d	0	0,38	3,03	12,35	0,84	3,02	67,68	56,40	37,37	181

Für die Ermittlung der Inhaltsstoffe wurden die Nahrungsbestandteile folgendermaßen zusammengefasst: Alle Beeren sind Preiselbeeren, alle Pilze Steinpilze, das gesamte Wurzelgemüse besteht aus Kartoffeln, das Obst aus Äpfeln, das Blattgemüse aus Feldsalat, Süßwasserfische sind Regenbogenforellen. Anstelle von Rentierfleisch wird Hirschfleisch angenommen. Getreide als sonst wichtigster Energielieferant fehlt, weil Getreideanbau im Treibhaus schwer vorstellbar ist.

#### **4.3.4 Expositionspfade**

In einem hochatlantischen TundrenszENARIO kann Brunnenwasser genutzt werden, in kontinentalen TundrenszENARIEN steht dem jedoch der Permafrostboden entgegen. Das Wasser wird für folgende Zwecke genutzt:

- Haushaltsgebrauch, insbesondere auch für Trinkwasser des Menschen
- Beregnung in Treibhäusern

Nach dem Gebrauch wird überschüssiges Wasser abgeleitet in einen Vorfluter. Hier sind folgende Nutzungen möglich:

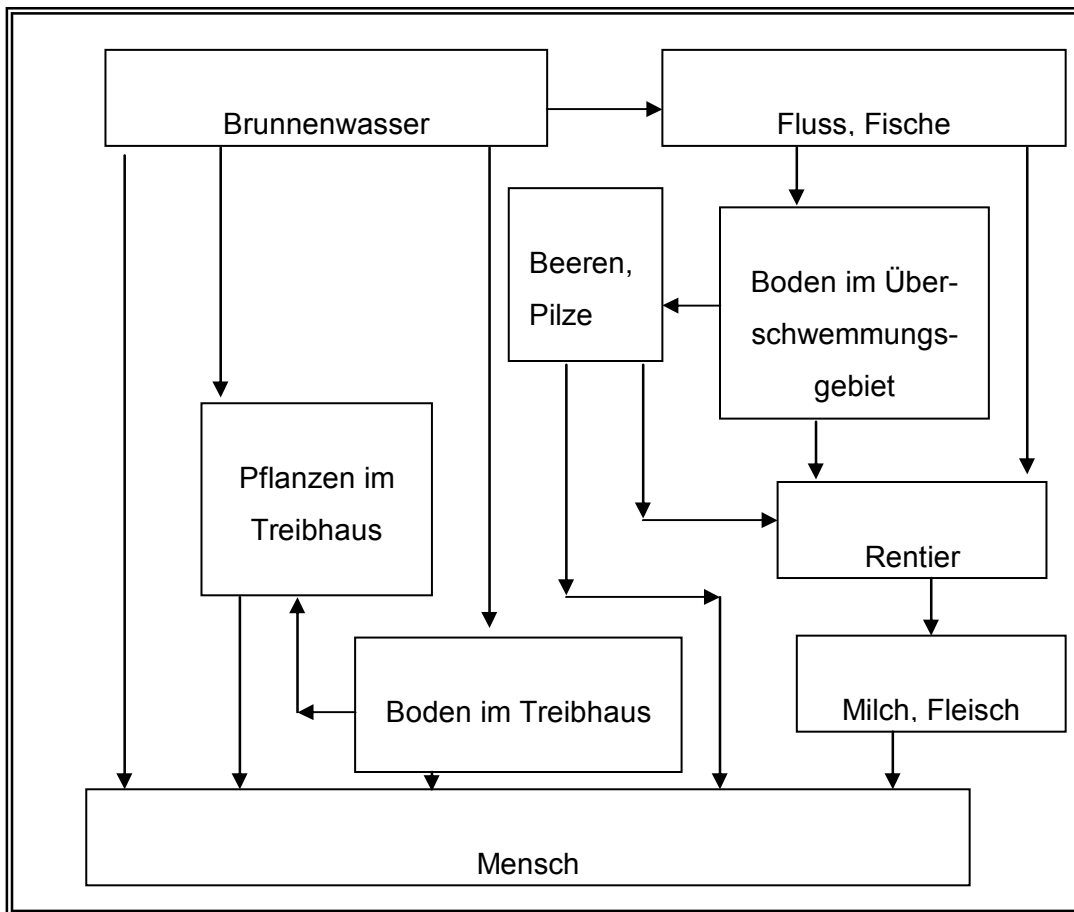
- Fischzucht
- Tränkwasser für Rentiere
- Überschwemmung von Arealen, in denen u. a. Beeren und Pilze wachsen

Insgesamt ergeben sich die in Abbildung 4.3 dargestellten Ingestionspfade. Weitere Expositionspfade sind:

- Externe Bestrahlung bei Aufenthalt im Überschwemmungsgebiet und im Treibhaus
- Interne Bestrahlung durch Inhalation bei Aufenthalt im Überschwemmungsgebiet und im Treibhaus

Rentierflechten wachsen in Überschwemmungsgebieten nicht, da sie auf trockene Standorte angewiesen sind /WAL 70/. Gleichwohl werden Rentiere regelmäßig im Überschwemmungsgebiet Gräser und Kräuter abweiden.

**Abb. 4.3** Ingestionspfade im Tundrenklima



#### 4.3.5 Platzbedarf der Dorfgemeinschaft

Die kritische Gruppe soll 20 Menschen umfassen. Diese Gruppe lebt von selbst erzeugter Nahrung.

#### Größe und Platzbedarf der Rentierherde

Es gibt ungefähr 20 Unterarten von Rentieren, die ausgewachsen zwischen 60 und 315 kg wiegen, wobei Tundrenrentiere kleiner als Waldrentiere sind /GRZ 68/; wenn das mittlere Schlachtgewicht 200 kg beträgt, wovon wie beim Rind 50 % essbar ist, müssen in der Gesellschaft ohne Treibhäuser pro Jahr 32 Rentiere geschlachtet werden; bei einem mittleren Schlachtalter von fünf Jahren müssen also 160 Rentiere allein für die Fleischversorgung gehalten werden. Nimmt man an, dass ein Rentier wie

ein Schaf im Jahr 500 l Milch /RUH 85/ gibt und dass die Hälfte der Milch für die Aufzucht der Kälber gebraucht wird, die ein halbes Jahr lang gesäugt werden /GRZ 68/, so ergibt sich ein Bedarf von 25 Rentierkühen für die Deckung des Bedarfs an Rentiermilch. Rentiere werden normalerweise etwa 12 Jahre alt. Pro Jahr müssen daher 32 Rentiere für die Fleischproduktion und zwei Tiere für die Milchproduktion geboren werden, und da Rentiere immer nur ein Junges haben, müssen 34 geschlechtsreife Weibchen vorhanden sein. In einer Herde von 160 Tieren ist diese Bedingung erfüllt. Zusätzliche Rentiere für die Milchproduktion brauchen daher nicht angenommen zu werden. Nach demselben Verfahren wird ermittelt, dass die Herde des Dorfes, das über Treibhäuser verfügt, 100 Tiere umfassen muss.

Die jährliche Primärproduktion der Tundra ist in Tabelle 4.1 angegeben. Es wird angenommen, dass maximal 10 % der jährlichen Primärproduktion von Rentieren aufgenommen wird und dass ein Ren 6.5 kg Trockenmasse am Tag verzehrt. Das ist die Hälfte des Futtermittelsverbrauchs von Hochleistungsrindern, denn die angenommene Rentierrasse ist knapp halb so groß wie die angenommene Rinderrasse. Der Platzbedarf für die Herde in der nördlichen Tundra ergibt sich zu ca. 300 km<sup>2</sup>, in der Waldtundra zu ca. 100 km<sup>2</sup>. Bei diesen Angaben wird berücksichtigt, dass eine einmal abgeweidete Fläche 10 Jahre zur Regeneration braucht, bevor sie erneut abgeweidet werden kann /HEN 97/. Die Herde der Dorfgemeinschaft, die über Treibhäuser verfügt, braucht eine Fläche von 200 km<sup>2</sup> in der nördlichen Tundra bzw. 60 km<sup>2</sup> in der Waldtundra. Dass diese Werte für den Flächenbedarf an der unteren Grenze liegen, also konservativ sind, wird an Hand der tatsächlichen Wege der Rentiere zwischen ihren Sommer- und Winterweiden, die bis zu 1000 km weit sein können /GRZ 68/, veranschaulicht.

Der Flächenbedarf hat zur Konsequenz, dass sich die Rentiere nur wenige Tage des Jahres in der Nähe der Siedlung über dem Endlager aufhalten und kontaminiertes Futter fressen können. Gleiches gilt im übrigen auch für jagdbares Wild, so dass dieses im Nahrungskorb vernachlässigt werden kann.

### **Beeren und Pilze**

Beeren und Pilze wachsen in der nördlichen und mittleren Tundra nicht, wohl aber in der südlichen Tundra und in der Waldtundra /WAL 70/. Es wird davon ausgegangen, dass dort 1 % der jährlichen Primärproduktion aus Preiselbeeren und Pilzen besteht, das sind 1.2 bis 1.4 g TM/m<sup>2</sup> a. Die günstigsten Wachstumsbedingungen finden die

Beeren einerseits an Südhängen, andererseits in der Nähe der Bach- und Flussläufe, also im potentiellen Überschwemmungsgebiet /WAL 70/. Aus den in Tabelle 3.1 und 3.2 angegebenen Daten für die Primärproduktion, die Verzehrsmengen und den Gehalt an Trockenmasse lässt sich die für die Dorfgemeinschaft benötigte Fläche zu ca. 0.15 km<sup>2</sup> berechnen. Das Überschwemmungsgebiet ist ausgedehnt genug, um diese Flächen zu beherbergen.

### Treibhäuser

Die Berechnung der Größe der Treibhäuser ist für die Ermittlung des benötigten Be-  
 regnungswassers notwendig. Sie setzt die Kenntnis der im Treibhaus erzielten Erträge voraus. Diese werden auf der Basis von Angaben in /RUH 85/ abgeschätzt. Danach liegt der Ertrag von Blattgemüse (Kopfsalat) bei 4 kg/m<sup>2</sup> und von Fruchtgemüse (Tomaten, Gurken) bei 8 bis 15 kg/m<sup>2</sup>; Angaben für Kartoffeln fehlen naturgemäß. Ein Vergleich der Angaben in /BRI 98, RUH 85, STA 97, TSC 64/ zeigt, dass die Erträge im Unterglasanbau deutlich höher als im Freiland sind. Die Obsterträge im Freiland in Deutschland werden, je nach Obstart und Jahr, auf ca. 0.3 bis 1.5 kg/m<sup>2</sup> geschätzt. Die Schätzung beruht auf den Ernteerträgen je Baum /RUH 85/, den empfohlenen Pflanzabständen /BRI 98/ und einigen Einzelwerten /TSC 64/. Die Freilandenerträge verschiedener Fruchtgemüse liegen zwischen 1 (Bohnen) und 5 kg/m<sup>2</sup> (Tomaten). Insgesamt kann der mittlere Ertrag von Obst und Fruchtgemüse grob auf 3 kg/m<sup>2</sup> geschätzt werden. Der mittlere Kartoffelertrag liegt im Freiland zwischen 2.5 und 5 kg/m<sup>2</sup>, für die Erträge im Treibhaus wurde der obere Wert angenommen. Die ermittelten Erträge und die benötigte Treibhausfläche sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

**Tab. 4.3** Benötigte Treibhausfläche in der Tundra

Pfad	Verbrauch in kg/a	Anteil Abfall	Ertrag in kg FM/(m <sup>2</sup> a)	Benötigte Fläche in m <sup>2</sup>
Wurzelgemüse in Unterglasanbau	220	0,2	5	1056
Obst und Fruchtgemüse in Unterglasanbau	90	0,08	3	648
Blattgemüse in Unterglasanbau	60	0,03	4	309
Fläche der Treibhäuser				<b>2013</b>



#### 4.3.6 Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft

Zugrunde gelegt wird hochatlantisches Klima wie in Island, da hier die Entnahme von Brunnenwasser aus dem Boden nicht durch Permafrostboden behindert wird.

Der Mensch nutzt das Brunnenwasser nicht nur zum Trinken, sondern auch für den Hausgebrauch zum Kochen, Waschen, Spülen und Putzen, außerdem zur Beregnung in den Treibhäusern. Das Abwasser wird in einen Fluss eingeleitet.

Rentiere haben auf Grund ihrer Weidegewohnheiten (siehe Abschnitt 4.2.5) nur beschränkt Zugang zu diesem Fluss. Ihre wichtigste Nahrung, die Rentierflechte, wächst bevorzugt auf trockenen hochwasserfreien Standorten. Andererseits ist der Pflanzenwuchs im Bereich der Flüsse besonders üppig /WAL 70/. Es wird davon ausgegangen, dass den Tieren ein quadratisches Weidegebiet unterhalb des Dorfes zur Verfügung steht, dass sie es gleichmäßig nutzen und dann aus dem Fluss trinken, wenn sie weniger als 250 m entfernt weiden. Ihr Wasserbedarf wird zu 15 l/d angenommen. Aus dem Fluss stammen dann etwa 2 l/d. In Tundren mit geringerer Primärproduktion würden die Rentiere noch weniger Wasser aus dem Fluss entnehmen, weil ihr Weidegebiet größer sein müsste und sie seltener zum Fluss kommen würden.

Der Wasserbedarf der Pflanzen in den Treibhäusern lässt sich aus Angaben über die Dauer der Wachstumsphase /BRI 98/ und den Wasserbedarf von entsprechenden Freilandpflanzen /RUH 85/ abschätzen.

- Kartoffeln: etwa 420 l/m<sup>2</sup>
- Obst: etwa 550 l/m<sup>2</sup>
- Blattgemüse: etwa 350 l/m<sup>2</sup>

Nach /BRI 98/ brauchen Kartoffeln während der Wachstumsphase 500 mm Regen oder Bewässerung. Alle diese Zahlen sind deutlich kleiner als der in /RUH 85/ angegebene Maximalbedarf von 2000 l/(m<sup>2</sup> a).

Im mehrjährigen Mittel ergibt sich bei Beachtung der Grundsätze der Fruchtfolge eine Beaufschlagung des Bodens in Höhe von 493 l/(m<sup>2</sup> a), gerundet 500 l/(m<sup>2</sup> a).

Die Tundra kann nicht nachhaltig ackerbaulich genutzt werden, da der Boden schnell zerstört würde und die Fruchtbarkeit zurückginge. Daher wird ein Ackerbau im Freiland nicht unterstellt. Dennoch sei erwähnt, dass eine Beregnung von ackerbaulich genutzten Flächen nicht notwendig wäre, so dass keine Radioaktivität in den Boden eingetragen würde.

Der Haushaltsbedarf wird aus Angaben in /UBA 97/ abgeleitet. Danach betrug die Abgabe von Wasser an Haushalte und Kleingewerbe im Jahre 1991 4.1 Mrd. m<sup>3</sup>. Im Durchschnitt ergibt sich daraus ein Verbrauch von 144 l pro Kopf und Tag; der reine Haushaltsverbrauch wird auf täglich 100 l pro Person geschätzt. Damit lässt sich die notwendige Wasserförderung des Brunnens abschätzen, siehe Tabelle 4.4. Das im Haushalt verbrauchte Wasser wird in den Fluss eingeleitet.

**Tab. 4.4** Wasserbedarf in einer atlantischen Tundra

Siedlung in einer atlantischen Tundra	20 Menschen
Bedarf zum Trinken (m <sup>3</sup> )	14
Bedarf im Haushalt (m <sup>3</sup> )	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m <sup>3</sup> )	993
gesamter Wasserbedarf im Dorf ohne Treibhäuser (m <sup>3</sup> )	<b>745</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf mit Treibhäusern (m <sup>3</sup> )	<b>1737</b>

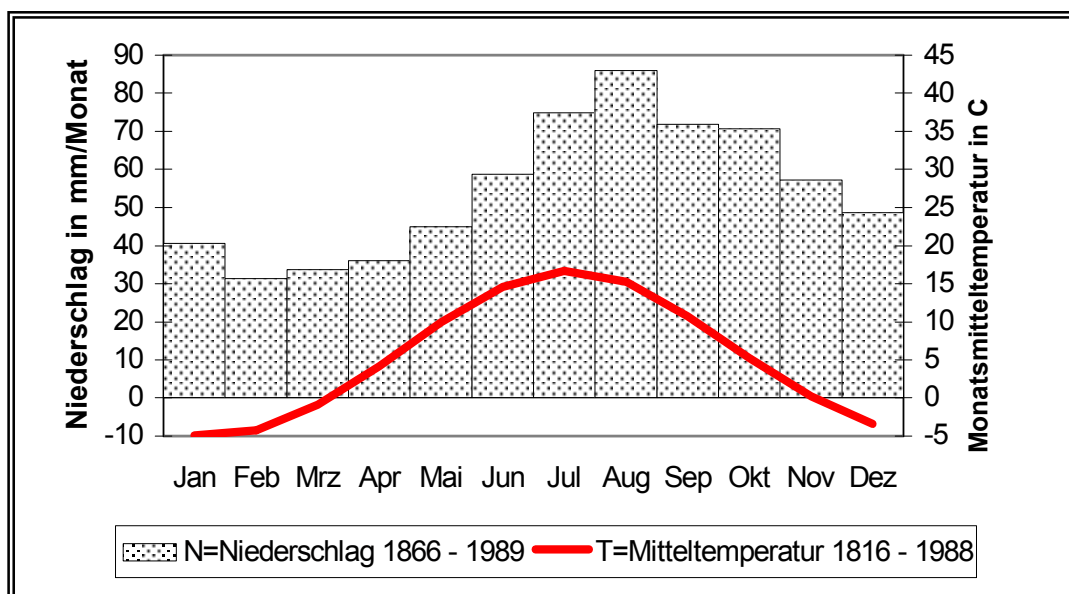
## 4.4 Feuchtwinterkaltes Klima (Df)

### 4.4.1 Klimatische Situation

Feuchtwinterkaltes Klima (Df), auch „boreales Nadelwaldklima“ genannt, herrscht in Skandinavien etwa zwischen dem 60. und 70. Breitengrad, während es sich in kontinentalen Lagen Europas teilweise bis zum 45. Breitengrad nach Süden erstreckt. In Amerika wird es in großen Teilen von Alaska und Kanada beobachtet /SCH 94/. Ähnlich ist das Klima auch in den Kammlagen der deutschen Mittelgebirge, jedoch unterscheidet es sich dadurch, dass im Mittelgebirge mehr Niederschlag fällt. Auch das heutige skandinavische Klima ist nicht identisch mit einem feuchtwinterkalten Klima in mittleren Breiten, weil der Winkel der Sonneneinstrahlung abweicht. Die tägliche Vegetationszeit im Sommer dauert demzufolge in höheren Breiten länger als in einem sonst vergleichbaren Klima in Deutschland.

Abbildung 4.4 zeigt das Klimadiagramm für Oslo (60 Grad nördlicher Breite, atlantisch) /UKA 98/. Der Standort liegt im Übergangsbereich zur Mischwaldzone, denn die Vegetationszeit dauert mit 123 Tagen etwas länger als typisch ist.

**Abb. 4.4** Klimadiagramm für feuchtwinterkaltes Klima: Oslo



Eine nähere Charakterisierung dieser Klimazone wird in /MÜL 81/ gegeben. Danach liegt die mittlere Jahrestemperatur zwischen  $-3^{\circ}$  und  $+3^{\circ}$  C, auf ozeanisch geprägten

Standorten auch höher. Im wärmsten Monat werden Mittelwerte zwischen 10 und 15° C erreicht, in kontinentalen Lagen 10 bis 20° C bei hochsommerlichen Spitzenwerten über 30° C. Die Jahresschwankung beträgt in atlantischen Lagen zwischen 13 und 19° C, erreicht aber in kontinentalen Lagen 40° C; diese Marke kennzeichnet den Übergang zum hochkontinentalen borealen Klima (trockenwinterkaltes Klima). Die Vegetationszeit, das ist die Zeit mit einer mittleren Temperatur über 10° C, beträgt 30 bis 120 Tage; in dieser Zeit fällt mindestens 100 mm Niederschlag. Die kalte Jahreszeit dauert sechs bis acht Monate.

#### 4.4.2 Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna

Die standorttypische Vegetation ist der boreale Nadelwald. In Norden grenzt er an die Tundra, im Süden an die Mischwaldzone. Wenn das Grundwasser in weniger als 50 cm Tiefe ansteht, wird das Wachstum der Bäume gehemmt und es entstehen Torfmoore. Tabelle 4.5 nach /WAL 70/ enthält Angaben über die gesamte oberirdische Phytomasse und die Nettoprimärproduktion. Werte anderer Autoren unterscheiden sich etwas, so gibt /SCH 94/ für die kontinentalen borealen Nadelwälder an, dass die Primärproduktion zwischen 0.4 und 2 kg/(m<sup>2</sup> a) liegt, im Mittel bei 0.8 kg/(m<sup>2</sup> a).

**Tab. 4.5** Angaben zur Phytomasse und Primärproduktion im borealen Nadelwald

Klimatop (Vegetationszone)	Oberirdische Phytomasse in kg/m <sup>2</sup> *	Primäre Produktion in kg/(m <sup>2</sup> a) *
Nördliche Fichtenwälder mit Moosen und Flechten	9	0.15
Mittlere Fichtenwälder mit Heidelbeeren	13	0.3
Südliche Fichtenwälder mit Sauerklee	22	0.5

\* die Angaben beziehen sich auf die Trockenmasse

Die Charakteristika des Bodens stehen in engem Zusammenhang mit dem Klima und der Vegetation, weniger mit dem Ausgangsgestein. Der typische Boden ist ein Podsol, außerdem treten Parabraunerden auf, im ozeanischen Bereich auch Rasenböden; im Übergangsbereich zur Tundra wegen der wasserundurchlässigen Permafrostschicht Podsolgleye /MÜL 81/. Wenn der Boden im Sommer weniger als 1 m tief auftaut, können Bäume nicht mehr gedeihen, dann wächst nur noch Tundravegetation. Im Übergangsbereich zum transbaikalischen Klima gibt es zwar auch Permafrostboden, aber

aber die Schichten liegen tiefer und beeinträchtigen daher die Bäume nicht. Moorböden sind in atlantischen Lagen weit verbreitet, in Finnland z. B. auf etwa 40 % des Gebietes /Wal 70/. Alle diese Böden sind nährstoffarm und sauer. Für die Mächtigkeit gilt: je niedriger die Temperaturen sind, desto geringer die Mächtigkeit des Bodens /MÜL 81/.

Podsol entsteht bei starker Bodendurchfeuchtung, falls aggressive saure Fulvosäuren den Hauptbestandteil der Huminstoffe bilden, mithin unter Nadelwäldern bei feuchten und kühlen Klimabedingungen. Mit der Zeit werden alle löslichen und beweglichen Bodenbestandteile ausgewaschen, insbesondere die Kationen, und in größerer Bodentiefe in schwächer saurem Milieu wieder ausgefällt. Typisch ist folgender Bodenaufbau /HEN 97/: unter einer Schicht von wenig bis stark zersetzten Pflanzenresten liegt ein Aschhorizont, der in seinem oberen Bereich humos ist, darunter folgen Humushüllenhorizont und Rosthüllenhorizont und der mineralische Unterboden; abgekürzt wird dies als [L-Of-Oh]-Ahe-Ae-Bh-Bs-C]. Eine gewisse natürliche Vermischung der Bodenhorizonte findet in kälteren Gebieten durch Kryoturbation statt; in wärmeren Gebieten erfolgt dagegen kaum eine Durchmischung. Normalerweise würden Bodentiere die Durchmischung bewirken, aber Podsolböden sind so sauer, dass sich dort kein reiches Bodenleben ausprägen kann.

Wenn solche Böden beackert werden, entstehen Rosterden, bei denen direkt auf dem Rosthüllenhorizont die Ackerkrume aufliegt. Auch bei Kalkung und organischer Düngung ist solcher Boden nur für anspruchslose Kulturen geeignet. Ackerbau verändert den Charakter des Bodens im Laufe der Jahrhunderte, denn durch Bildung von Huminsäuren an Stelle von Fulvosäuren geht der Säuregrad zurück, und auch Düngung mit organischer Substanz verbessert die Bedingungen für das Bodenleben /HEN 97/.

#### **4.4.3 Gewinnung der Nahrungsmittel**

Nicht das gesamte Gebiet wird landwirtschaftlich genutzt. Die Ackerbaugrenze verläuft etwa 5 bis 10 Breitengrade südlich der Waldgrenze. Die schlechte Bodenqualität erfordert hohe Düngergaben /MÜL 81/. Am weitesten nach Norden dringt die Sommergerste vor, die mit 91 bis 95 Vegetationstagen auskommt /MÜL 81/. Hafer und Roggen werden im Süden des borealen Nadelwaldes angebaut. Viele Kohlarten sind winterhart /BRI 98/; ihre Vegetationszeit dauert bis zum Einsetzen scharfer Nachfrös-

te. Auch Kartoffeln können ab einer Vegetationszeit von ungefähr 90 Tagen angebaut werden. Lebensgrundlage der Bauern bildet jedoch die Viehzucht, insbesondere die Rinderhaltung, auch die Jagd ist bedeutend.

Im nördlichen Teil der Tundra leben die Menschen von Viehzucht und ergänzen ihre Nahrung durch Beeren und Pilze, außerdem besteht die Möglichkeit zur Pflanzenzucht in Treibhäusern. Im mittleren und südlichen Teil werden Getreide, Kartoffeln und winterhartes Gemüse im Freiland angebaut, außerdem die Gemüsesorten, die mit einer kurzen Vegetationszeit auskommen. Beeren und Pilze wachsen wild. Fischzucht wird angenommen, die Jagd jedoch nicht, da die jagdbaren Tiere so große Reviere brauchen, dass sie nur selten im Fluss trinken oder im Überschwemmungsgebiet äßen.

Die täglich benötigte Energiezufuhr bei bäuerlicher Lebensweise wird auf 3000 kcal geschätzt. Folgende Varianten der Bedarfsdeckung werden betrachtet:

- Viehzüchter ohne Treibhäuser (nördliche boreale Nadelwaldzone)
- Viehzüchter mit Treibhäusern (nördliche boreale Nadelwaldzone)
- Viehzüchter mit Ackerbau und Treibhausnutzung (südliche boreale Nadelwaldzone)

Obgleich auch im nördlichen und mittleren Bereich der borealen Waldzone der Anbau von Gerste, Kartoffeln und Kohl bei geringen Erträgen möglich ist, wird diese Konstellation hier ausgelassen, denn an Hand der Klimadiagramme lässt sich zeigen, dass die Beregnung hier eine ganz untergeordnete Rolle spielen muss. Das führt dazu, dass die Radionuklidkonzentration in den Feldfrüchten vernachlässigbar ist.

In Tabelle 4.6 werden Angaben zur Zusammensetzung der Nahrungsmittel und zu den drei verschiedenen Verzehrsgewohnheiten gemacht. Folgende vereinfachende Zuordnungen erfolgen: Beeren sind hier Heidelbeeren, im Freiland werden Kartoffeln, Gerste (Getreide) und Kohl (Blattgemüse) gezogen, Milch und Fleisch werden von mittelfetten Rindern geliefert, die anderen Nahrungsmittel entsprechen denen der Tundra. Es wird angenommen, dass das gesamte Obst aus dem Treibhaus stammt, obwohl auch im Freiland Kernobst und Beerenobst gut gedeihen. Diese Annahme ist konservativ, weil der Beregnungsbedarf bei Freilandpflanzen geringer als bei Gewächshauspflanzen ist.

**Tab. 4.6** Nahrungskörbe im feuchtwinterkalten Klima (boreale Nadelwaldzone)

		Was- ser	Bee- ren	Pil- ze	Kar- tof- feln	Obst	Feld- salat	Ger- ste	Kohl	Milch	Fleisch	Fisch	Sum- me
Abfall	Anteil	0	0	0,2	0,2	0,08	0,03	0	0,5	0	16	0,48	
Wasser	%	100	84,9	89	77,8	85,3	93,4	12,5	86,3	87,5	60,0	76,3	
Energie	kcal./ 100 g	0	56,0	34	81,2	49,9	17,7	343	36,2	65,4	271	207	
Fett	%	0	0,60	0,4	0,11	0,40	0,36	3,80	0,90	3,78	21,7	2,7	
Eiweiß	%	0	0,60	2,8	2,05	0,34	1,84	9,20	4,30	3,33	17,5	19,5	
Kohle- hydrate	Anteil	0	13,6	4,8	18,5	12,6	2,9	71,0	5,1	4,7	0,0	0,0	
<b>Dorf im Norden</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>700</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>360</b>	<b>220</b>	<b>100</b>	
Energie	kcal/d	0	92,0	65	0	0	0	0	0	645	1629	567,9	2999
Fett	g/d	0	0,99	0,8	0	0	0	0	0	37,3	130,7	7,47	177
Eiweiß	g/d	0	0,99	5,3	0	0	0	0	0	32,8	105,4	53,4	198
<b>Dorf im Norden mit Treib- häusern</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>700</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>220</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>180</b>	<b>60</b>	
Energie	kcal/d	0	92,0	56	489	123	29,0	0	0	537	1333	340,7	3000
Fett	g/d	0	0,99	0,7	0,66	0,99	0,59	0	0	31,0	106,9	4,48	146
Eiweiß	g/d	0	0,99	4,6	12,3	0,84	3,02	0	0	27,4	86,24	32,0	167
<b>Dorf im Süden mit Treib- häusern</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>700</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>170</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>150</b>	<b>120</b>	<b>50</b>	
Energie	kcal/d	0	76,7	46	378	123	29,0	846	59	269	888,8	283,9	3000
Fett	g/d	0	0,82	0,5	0,51	0,99	0,59	9,36	1,48	15,5	71,3	3,74	105
Eiweiß	g/d	0	0,82	3,8	9,54	0,84	3,02	22,7	7,06	13,7	57,5	26,7	146

#### 4.4.4 Expositionspfade

Die Wasserförderung erfolgt über einen Brunnen; im Bereich der nördlichen borealen Waldzone besteht zwar noch Permafrostboden, jedoch nur in kontinentalen Lagen, die hier nicht angenommen werden.

Das Wasser wird für folgende Zwecke gebraucht:

- Trinkwasser für den Menschen
- Tränkwasser für das Vieh
- Beregnung in Treibhäusern
- Beregnung der Felder und Weiden.

Nach dem Gebrauch wird überschüssiges Wasser in einen Vorfluter abgeleitet. Hier sind folgende Nutzungen möglich:

- Fischzucht
- Überschwemmung von Arealen, in denen Beeren und Pilze wachsen
- Überschwemmung von Weideflächen.

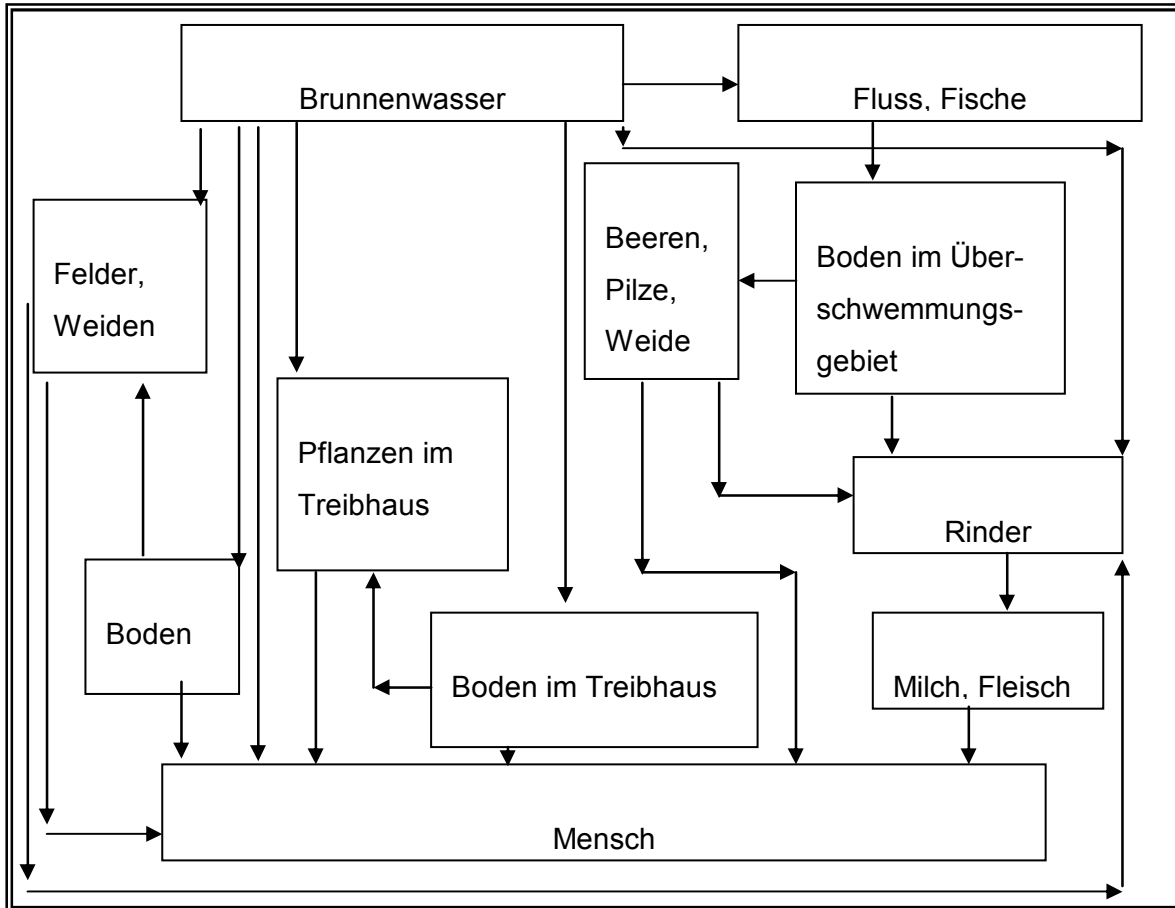
Insgesamt ergeben sich die in Abbildung 4.5 dargestellten Ingestionspfade. Nicht eingezeichnet wurde der Ingestionspfad: Boden – Rind – Milch/Fleisch – Mensch.

Weitere nicht in Abbildung 4.5 aufgenommene Expositionspfade sind:

- Externe Bestrahlung bei Aufenthalt im Überschwemmungsgebiet, im Treibhaus und auf beregneten Feldern und Weiden
- Interne Bestrahlung durch Inhalation bei Aufenthalt im Überschwemmungsgebiet, im Treibhaus und auf beregneten Feldern und Weiden
- Interne Bestrahlung durch Inhalation bei der Verarbeitung von Holz von Bäumen aus dem Überschwemmungsgebiet.



**Abb. 4.5** Ingestionspfade im feuchtwinterkalten Klima  
 ohne Pfad Boden – Rind – Milch/Fleisch – Mensch)



#### 4.4.5 Platzbedarf der Dorfgemeinschaft

Auch diese kritische Gruppe soll 20 Menschen umfassen.

#### Größe und Platzbedarf der Rinderherde.

Das Schlachtgewicht der Bullen beträgt ungefähr 400 bis 600 kg /LÖH 76, RUH 85/, im Mittel 500 kg; 58.6 % des Gewichts des Tieres sind als Rinderhälften vermarktungsfähig (halbfette Rinder); der Rest entfällt auf Eingeweide, Kopf und Zunge, Haut, Hörner, Beine, Blut und Abfall /LÖH 76/. 84 % der Rinderhälften sind für die mensch-

liche Ernährung verwendbar /SOU 81/, das sind ca. 250 kg/Tier. Das Schlachalter für Kälber mit 200 kg Lebendgewicht liegt bei etwa 6 Monaten, im Alter von ca. 10 Monaten sind 300 kg („Baby-beef“) erreicht, mit etwa 15 bis 18 Monaten das optimale Gewicht von 500 kg. Dagegen beträgt das Schlachtgewicht der Jungochsen im Alter von 3 Jahren 700 kg /LÖH 76/. Hier wird von einem durchschnittlichen Schlachalter von 30 Monaten ausgegangen.

Die durchschnittliche Milchleistung von Rinderrassen, die das oben berechnete mittlere Schlachtgewicht aufweisen, ist von ca. 4000 bis 5000 l/Kuh im Jahre 1973 auf ca. 4500 bis 6000 l/Kuh im Jahre 1983 gestiegen /RUH 85/ und beträgt inzwischen 5000 bis 6000 l/Kuh /STA 97/. Hier wird von einer mittleren Milchleistung von 5000 l/Jahr in der borealen Nadelwaldzone ausgegangen. Die jungen Kühe kalben im Alter von ca. 2 bis 2.5 Jahren zum ersten Mal und werden dann 5 bis 10 Jahre genutzt /LÖH 76/. Da die Kühe nur 10 Monate pro Jahr gemolken werden können, müssen immer mindestens 2 Kühe gehalten werden.

Diese Zahlen erlauben, die Größe der notwendigen Herde zu ermitteln. Es stellt sich heraus, dass mehr Tiere für die Fleischerzeugung gebraucht werden als für die Milch-erzeugung, so dass ein Teil der Schlachtrinder weiblich sein muss und schon gekalbt hat, siehe Tabelle 4.7. Zusätzliche Mutterkühe werden daher nicht angenommen.

**Tab. 4.7** Größe der Rinderherde unter den Bedingungen Klimazone Df

Typ	jährliche Schlachtungen	Rinderherde (Stückzahl)
nördliche Zone ohne Treibhäuser	18	45
nördliche Zone mit Treibhäusern	15	38
südliche Zone mit Treibhäusern	10	25

Die für die Ernährung der Tiere notwendige Fläche unterscheidet sich je nach der Lage im nördlichen oder südlichen Teil dieser Klimazone. Die Vegetationszeit dauert zwischen 30 und 120 Tage. Dementsprechend unterscheidet sich die Höhe der Primärproduktion im Wald, siehe Tabelle 4.5, und auch die Primärproduktion von Wiesen und Weiden muss von Norden nach Süden zunehmen. Anhaltspunkte für die Höhe der Primärproduktion auf Wiesen und Weiden können aus den Alpen gewonnen werden. Bei geschlossenen Matten werden zwischen 50 und 275 g/m<sup>2</sup> beobach-

tet /WAL 70/; /RUH 85/ gibt für „arme Wald- und Bergwiesen“ 100 bis 150 g/m<sup>2</sup> an. Dass diese Zahlen bei aller Unsicherheit auf die Verhältnisse in einem borealen Nadelwaldklima in mittleren Breiten übertragen werden können, zeigt ein Vergleich mit der Primärproduktion in der Tundra (120 g/m<sup>2</sup> in der südlichen Tundra nach Tabelle 3.1) und in Nadelwäldern (150 bis 500 g/m<sup>2</sup> nach Tabelle 3.5). Bei einer Primärproduktion in Höhe von 500 g/m<sup>2</sup>, von der 80 % genutzt werden können /RUH 85/, und einem täglichen Bedarf von 65 kg frischem Grünfutter, ergibt sich, dass die Rinderherde in der südlichen Nadelwaldzone 0.3 km<sup>2</sup> Wiesen und Weiden braucht. Im nördlichen Teil der Nadelwaldzone sind 2.1 bzw. 1.8 km<sup>2</sup> Wiesen und Weiden notwendig.

### **Treibhäuser**

Die in der nördlichen Nadelwaldzone benötigten Flächen in den Treibhäusern sind identisch mit denen in der Tundra, siehe Tabelle 4.3. In der südlichen Nadelwaldzone erfolgt der Anbau von Kartoffeln, Getreide und einem Teil des Gemüses im Freiland.

### **Felder**

Angaben über den Gerstenertrag im Jahr 1982 im Europa der Zehn werden in /RUH 85/ gemacht. Da die Hauptanbauggebiete von Italien und Griechenland in einer anderen Klimazone liegen, werden diese Länder ausgeklammert. In den übrigen liegen die Erträge zwischen 380 g/m<sup>2</sup> in Luxemburg und 570 g/m<sup>2</sup> in Belgien, im am weitesten nördlich gelegenen Land Dänemark wird mit 430 g/m<sup>2</sup> ziemlich exakt der Durchschnitt erreicht. Der Kartoffelertrag reicht von 3.0 kg/m<sup>2</sup> in Deutschland bis 3.75 kg/m<sup>2</sup> in den Niederlanden; Dänemark liegt mit 3.5 kg/m<sup>2</sup> in der Spitzengruppe /RUH 85/. Der Ertrag von Kohl im kaltgemäßigten Klima dürfte hinter dem mittleren Ertrag in Deutschland (zwischen 1 kg/m<sup>2</sup> für Rosenkohl und 6 kg/m<sup>2</sup> für Weißkohl /STA 97/ zurückbleiben. Die benötigte Fläche für Felder geht aus Tabelle 4.8 hervor.

**Tab. 4.8** Felder im südlichen Teil der Klimazone Df (boreale Nadelwaldzone)

	Ertrag	Anteil Abfall	Verbrauch	Platzbedarf
	kg/m <sup>2</sup>		kg/Kopf	m <sup>2</sup>
Gerste	0,4	0	90	4500
Kartoffeln	3,5	0,2	60	411
Kohl	2	0,5	170	2550
Summe				<b>7461</b>

#### 4.4.6 Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft

Fleischrinder brauchen täglich etwa 35 l Wasser, wenn sie auf der Weide stehen, aber 50 bis 80 l, wenn sie Trockenfutter erhalten /LÖH 76/, Milchkühe brauchen noch mehr Wasser auf Grund der Milchleistung. Es wird mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 75 l/Tag sowohl für Fleischrinder als auch für Milchrinder gerechnet /BMU 01/.

Der Beregnungsbedarf für die Treibhäuser wird nach dem in Abschnitt 4.2.6 erklärten Verfahren ermittelt. Die Werte für den nördlichen Teil der borealen Nadelwaldzone entsprechen denen der Tundra (Tabelle 4.4), aber in der südlichen Nadelwaldzone werden die Kartoffeln im Freiland angebaut, wodurch der Beregnungsbedarf im Treibhaus auf 957 m<sup>2</sup> Beregnungsfläche mit durchschnittlich 485 l/m<sup>2</sup> a sinkt.

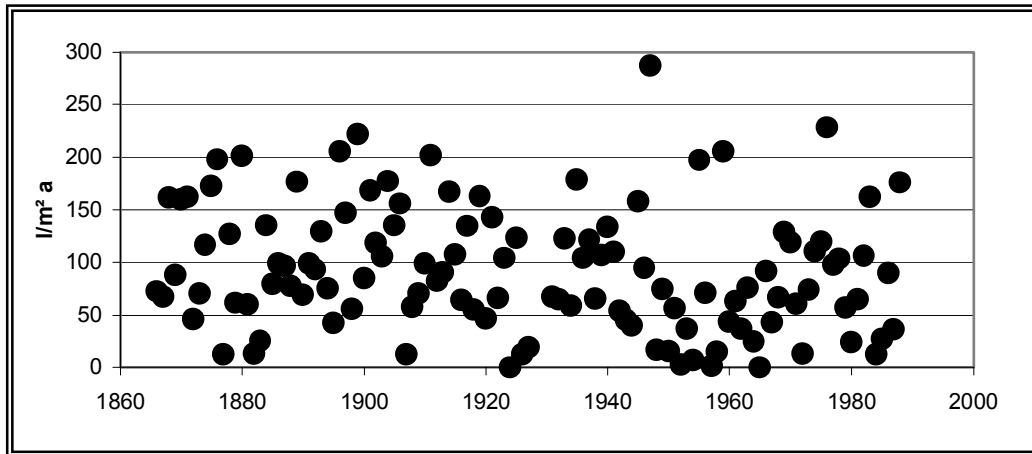
Eine Beregnung von Äckern und Weiden erfolgt derzeit nur ausnahmsweise. Der Bedarf orientiert sich dabei nicht am mittleren Klima sondern am aktuellen Wetter. Deshalb wurden die Wetteraufzeichnungen von Oslo /UKA 98/ analysiert. Angaben über die mittleren Monatstemperaturen liegen für die Zeit von 1816 bis 1988 vor, Angaben für die monatlichen Niederschläge von 1866 bis 1989. Folgende Festsetzungen werden getroffen:

- Bei mittleren Monatstemperaturen unter 5 C wird nie beregnet.
- Bei höheren Temperaturen wird so viel Wasser zugeführt, dass die Summe aus natürlichem Niederschlag und Beregnung in mm/Monat in den Monaten April und September der dreifachen, in den Monaten Mai, Juli und August der fünffachen und im Juni der sechsfachen mittleren Temperatur in C entspricht.

Im Mittel über diese 120 Jahre ergibt sich beim Klima von Oslo ein Beregnungsbedarf von 100 l/m<sup>2</sup> a, (exakt 93 l/m<sup>2</sup> a) von dem mehr als 95 % in die Monate Mai bis August fällt. Während in manchen Jahren gar nicht beregnet werden muss, kommen auch

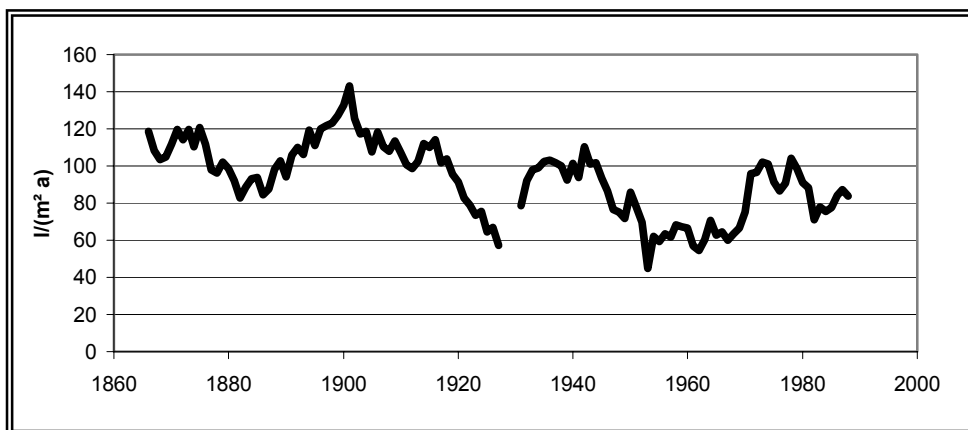
Trockenjahre vor, z. B. 1947 mit einem theoretischen Bedarf von 280 l/m<sup>2</sup>, siehe Abbildung 4.6.

**Abb. 4.6** Beregnungsbedarf im Süden der borealen Nadelwaldzone(Oslo)



Aus vielen Einzeljahren lässt sich ein Trend ableiten. Hierzu erfolgt eine gleitende Mittelwertbildung über jeweils 11 Jahre. Beispiel: Dem Wert für 1970 wird der Mittelwert für die Zeit von 1965 bis 1975 zugeordnet. Durch diese Operation werden die Ausreißer beseitigt, siehe Abbildung 4.7.

**Abb. 4.7** Bereinigter Beregnungsbedarf im Süden der borealen Nadelwaldzone



Die Abbildung zeigt nicht nur, dass jede Mittelwertbildung über einen Zeitraum von wenigen Dezennien einer gewissen Willkür unterliegt, sondern auch, dass das Klima niemals konstant ist und sich stetig ändert.

Beim Vergleich der hier ermittelten Berechnungsraten mit Erfahrungswerten ist zu bedenken, dass der betriebswirtschaftliche Aspekt außer Acht gelassen wurde. Investitionen für Beregnungsanlagen werden in der Praxis nur dann getätigt, wenn der erwartete Mehrertrag den Aufwand rechtfertigt.

Die Verteilung des Beregnungsbedarfes auf die einzelnen Monate wird in Tabelle 4.9 angegeben.

**Tab. 4.9** Verteilung des Beregnungsbedarfs in der Klimazone Df

Monat	%	Monat	%	Monat	%
JAN	0	MAY	16	SEP	3
FEB	0	JUN	39	OCT	0
MAR	0	JUL	24	NOV	0
APR	1	AUG	18	DEC	0

Der gesamte Wasserbedarf der drei verschiedenen Dorfgemeinschaften geht aus Tabelle 4.10 hervor. In der südlichen Zone werden dabei zwei Fälle unterschieden: entweder werden auch Weiden beregnet oder der Bauer spart die Investition für Beregnungsanlagen ein und bearbeitet statt dessen eine größere Fläche.

**Tab. 4.10** Wasserbedarf in der Klimazone Df

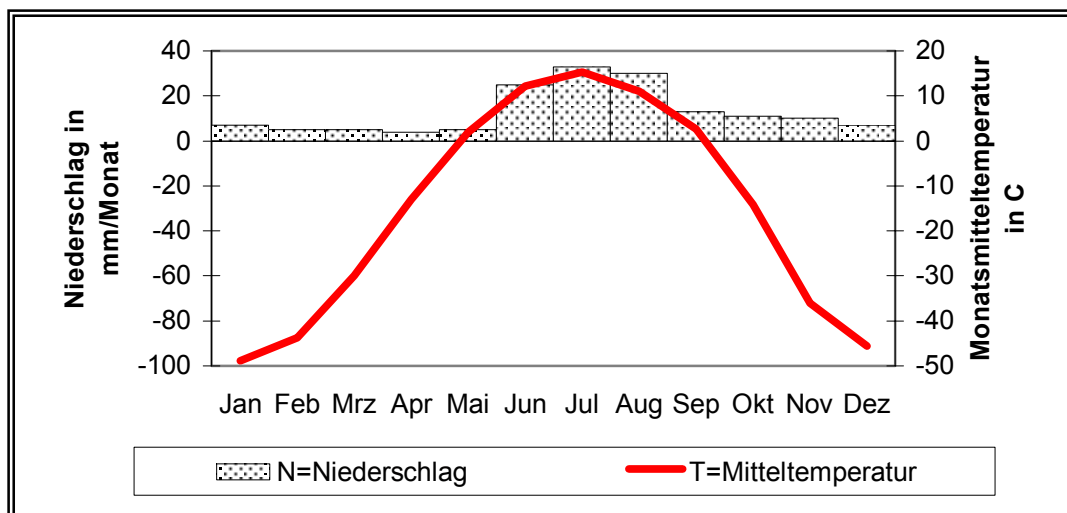
	nördliche Zone, keine Treibhäuser	nördliche Zone, mit Treibhäusern	südliche Zone
Bedarf zum Trinken (m <sup>3</sup> )	14	14	14
Viehtränke (m <sup>3</sup> )	1233	1041	685
Bedarf im Haushalt (m <sup>3</sup> )	731	731	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m <sup>3</sup> )	0	993	465
Bedarf zur Beregnung der Felder (m <sup>3</sup> )	0	0	746
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m <sup>3</sup> )	0	0	30000
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> )	<b>1978</b>	<b>2778</b>	<b>32640</b>
Wasserbedarf ohne Beregnung der Weiden (m <sup>3</sup> )	<b>1978</b>	<b>2778</b>	<b>2640</b>

## 4.5 Wintertrockenes Klima (Dw)

### 4.5.1 Klimatische Situation

Wintertrockenes Klima (Dw), auch transbaikalisches Klima genannt, tritt zur Zeit in den östlichen Teilen Sibiriens auf. Es unterscheidet sich von der Situation Df durch größere jahreszeitlich bedingte Unterschiede: die Sommer sind heißer, die Winter kälter, die spärlichen Niederschläge fallen überwiegend im Sommer. Das Klimadiagramm von Verkhojansk (Rußland, Sibirien, 67° nördliche Breite) /SCH 94/ ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Die mittlere Jahrestemperatur liegt hier bei  $-15^{\circ}\text{C}$ , doch in der Zeit von Mai bis August können Höchsttemperaturen von über  $30^{\circ}\text{C}$  gemessen werden. Mittlere Temperaturen über  $10^{\circ}\text{C}$  treten hier an 70 Tagen im Jahr auf.

**Abb. 4.8** Klimadiagramm für wintertrockenes Klima: Verkhojansk



### 4.5.2 Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna

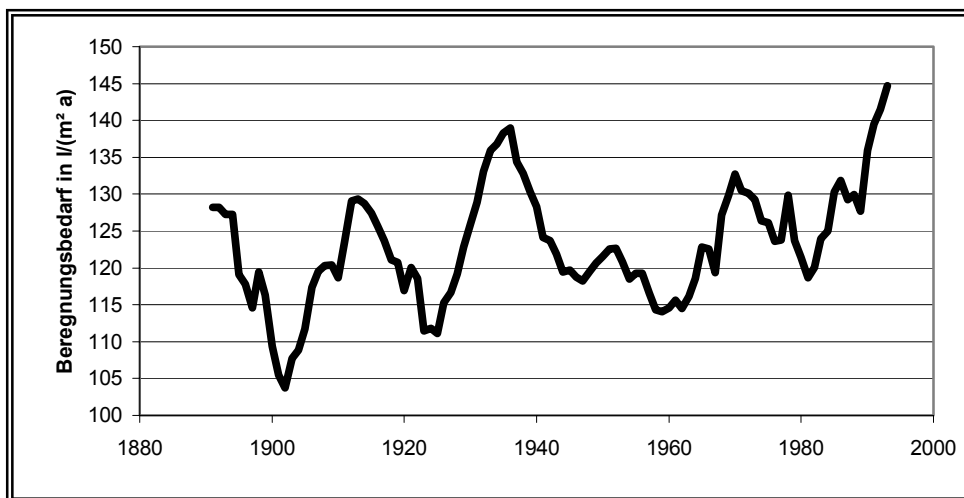
Die Verhältnisse sind ähnlich wie im feuchtwinterkalten Klima, allerdings herrschen Bäume vor, die geringere Ansprüche an die Wasserversorgung stellen; daher wird die Waldgrenze von der sommergrünen Lärche gebildet. Vorherrschender Boden ist auch hier Podsol, außerdem in Flussniederungen Gleypodsol /MÜL 81/.

### 4.5.3 Gewinnung der Nahrungsmittel

Die Unterschiede zur feuchtwinterkalten Klimazone sind gering: im Norden findet kein Ackerbau statt, der Süden gehört zur subarktischen Gerstenzone, in der auch Kartoffeln und Gemüse angebaut werden können, außerdem können Rinder gehalten werden /MÜL 81/.

Zur Erzielung eines optimalen Ertrags ist eine zusätzliche Beregnung in den Monaten Juni, Juli und August erforderlich. Das Berechnungsverfahren für die Beregnungsmenge weicht von dem Verfahren für feuchtwinterkaltes Klima ab, da die Datenlage nicht ausreicht. Zwar können die monatlich gemessenen Temperaturen /UKA 98/ herangezogen werden, aber nur Mittelwerte für die monatlichen Niederschlagsmengen /SCH 94/. Auf diese Weise ergibt sich ein mittlerer Beregnungsbedarf von 125 l/m<sup>2</sup> a, (exakt 123 l/m<sup>2</sup> a) siehe Abbildung 4.9.

**Abb. 4.9** Beregnungsbedarf im wintertrockenen Klima (Verkhoyansk)



Die Berechnungen mit mittleren Niederschlägen zeigen, dass in jedem einzelnen Juni, Juli und August beregnet werden muss, während in den Monaten Mai und September die monatliche Mitteltemperatur häufig unter 5 Grad C liegt; so dass keine Beregnung erfolgt, weil das Pflanzenwachstum nicht richtig in Gang kommt. Der begrenzende Faktor ist somit die Temperatur, die durch Einzelwerte belegt ist, und nicht der Niederschlag, für den nur Durchschnittswerte bekannt sind. Die Nutzung von Durchschnittswerten statt Einzelwerten für den Niederschlag kann daher keinen hohen Einfluss auf den berechneten Beregnungsbedarf haben. Geographisch gesehen liegt Verkhoyansk ungefähr in der Mitte des wintertrockenen Gebietes. Es ist trotzdem kein



typischer Standort, sondern der winterliche Kältepol; da aber im Winter sowieso nicht beregnet wird, bleibt dies ohne Einfluss. Im Norden sind die sommerlichen Temperaturen niedriger, im Süden höher. Daher wird im Norden ein Beregnungsbedarf von 60 l/(m<sup>2</sup> a), im Süden von 200 l/(m<sup>2</sup> a) angenommen.

**Tab. 4.11** Nahrungskörbe im wintertrockenen Klima

		Was- ser	Bee- ren	Pil- ze	Kartof- feln	Obst	Feld- salat	Ger- ste	Kohl	Milch	Fleisch	Sum- me
Abfall	Anteil	0	0	0,2	0,2	0,08	0,03	0	0,49	0	0,16	
Wasser	%	100	84,9	89	77,8	85,3	93,4	12,5	86,3	87,5	60,0	
Energie	kcal./ 100 g	0	56,0	34	81,2	49,9	17,7	343	36,2	65,4	271	
Fett	%	0	0,60	0,4	0,11	0,40	0,36	3,80	0,90	3,78	21,7	
Eiweiß	%	0	0,60	2,8	2,05	0,34	1,84	9,20	4,30	3,33	17,5	
Kohle- hydrate	Anteil	0	13,6	4,8	18,5	12,6	2,9	71,0	5,1	4,7	0,0	
<b>Dorf im Norden</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>800</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>390</b>	<b>290</b>	
Energie	kcal/d	0	92,0	65	0	0	0	0	0	699	2147,9	3004
Fett	g/d	0	0,99	0,8	0	0	0	0	0	40,4	172,29	214
Eiweiß	g/d	0	0,99	5,3	0	0	0	0	0	35,6	138,9	181
<b>Dorf im Norden mit Treib- häusern</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>800</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>240</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>220</b>	
Energie	kcal/d	0	92,0	56	533,55	123	29,0	0	0	537	1629,5	3000
Fett	g/d	0	0,99	0,7	0,72	0,99	0,59	0	0	31,0	130,7	166
Eiweiß	g/d	0	0,99	4,6	13,5	0,84	3,02	0	0	27,4	105,41	156
<b>Dorf im Süden mit Treib- häusern</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>800</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>200</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>110</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>120</b>	
Energie	kcal/d	0	76,7	37	444,63	123	29,0	1034	99,2	269	888,8	3001
Fett	g/d	0	0,82	0,4	0,60	0,99	0,59	11,4	2,46	15,5	71,3	104
Eiweiß	g/d	0	0,82	3,0	11,23	0,84	3,02	27,7	11,8	13,7	57,5	130

Die Zusammensetzung der Nahrung entspricht weitgehend der Zusammensetzung im feuchtwinterkalten Klima. Nur die Möglichkeiten zum Fischfang werden in Anbetracht der geringen Niederschläge stark eingeschränkt sein. Daher werden in Tabelle 4.11 Nahrungskörbe ohne Fisch entwickelt. Wild kommt im Nahrungskorb ebenfalls nicht vor, da es sein Futter ganz überwiegend auf unberegneten Flächen gewinnen muss.

Nur im Nordbereich könnte bis zu 1 % des Fleischbedarfs von Wild stammen, das während der Vegetationsperiode auf berechneten Flächen geäst hat. Dies wird als vernachlässigbar angesehen.

#### **4.5.4 Expositionspfade**

Die Wasserförderung erfolgt über einen Brunnen; im Bereich der nördlichen wintertrockenen Zone besteht zwar noch Permafrostboden, der die Nutzung von Brunnen deutlich erschwert, doch erscheint es möglich, dass die Wärmeentwicklung im Endlager für radioaktive Stoffe ausreicht, um ein Loch in die Permafrostschicht zu tauen.

Das Wasser wird für folgende Zwecke gebraucht:

- Trinkwasser für den Menschen
- Tränkwasser für das Vieh
- Beregnung in Treibhäusern
- Beregnung der Felder und Weiden.

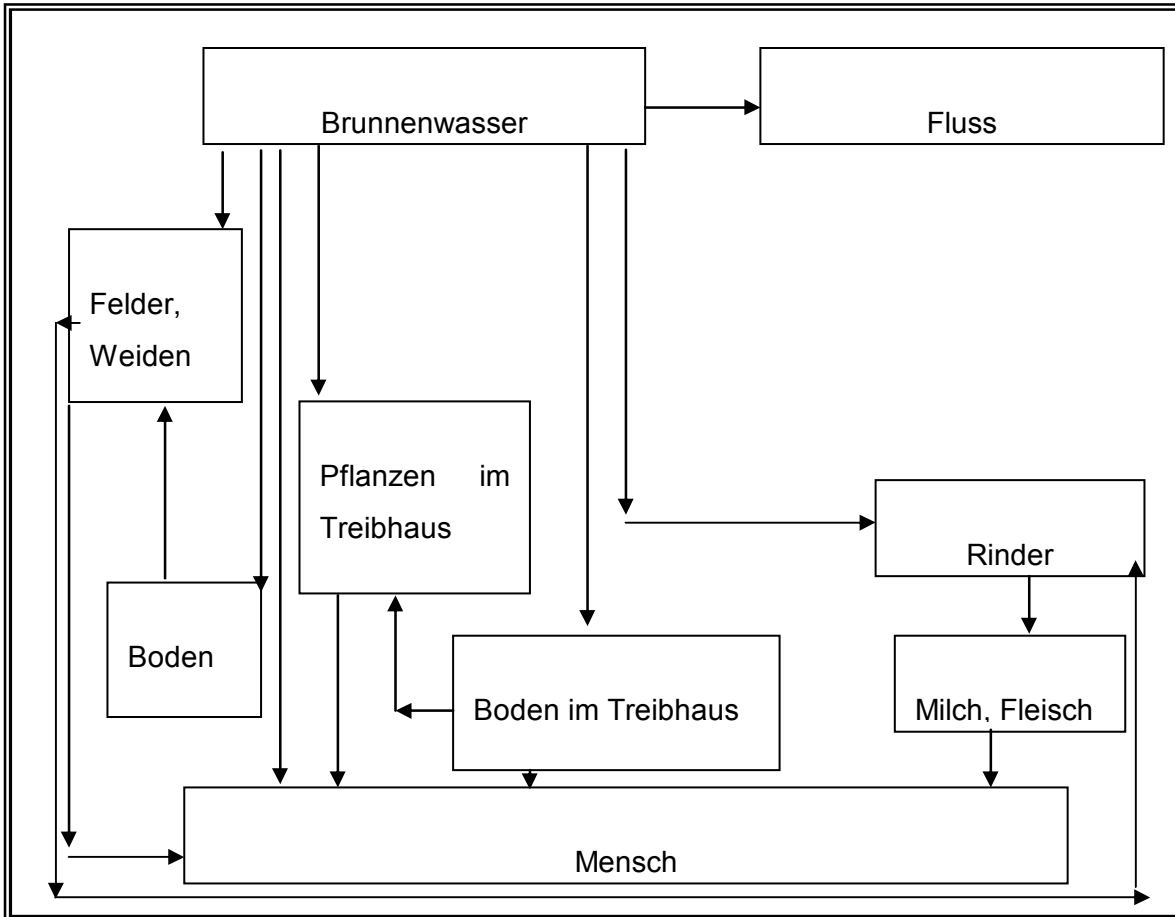
Insgesamt ergeben sich die in Abbildung 4.10 dargestellten Ingestionspfade. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde der Pfad: Boden – Rind – Milch/Fleisch – Mensch nicht eingezeichnet.

Weitere Expositionspfade sind:

- Externe Bestrahlung bei Aufenthalt im Treibhaus und auf berechneten Feldern und Weiden
- Interne Bestrahlung durch Inhalation bei Aufenthalt im Treibhaus und auf berechneten Feldern und Weiden

Zwar wird überschüssiges Wasser wie in den anderen Szenarien nach Gebrauch in einen Vorfluter abgeleitet, doch kommt es bei diesen Klimabedingungen nicht zu ausgeprägten Überschwemmungen während der Schneeschmelze, da im Winter Trockenheit herrscht. Deshalb werden die Areale am Ufer nicht überschwemmt.

**Abb. 4.10** Ingestionspfade im wintertrockenen Klima  
(ohne Pfad Boden – Rind – Milch/Fleisch – Mensch)



#### 4.5.5 Platz- und Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft

Die Erträge stimmen mit denen im Szenario für feuchtwinterkaltes Klima überein. Unterschiede im Nahrungsverbrauch ergeben sich auf Grund der Trockenheit, da der Verzehr von Fisch durch andere Nahrungsmittel, insbesondere Milch und Fleisch, ersetzt wird. Die Tabellen 4.12 bis 4.15 geben Auskunft über den Platzbedarf, in Tabelle 4.16 wird der Wasserbedarf ermittelt.

Die Erträge der Weiden entsprechen denen im feuchtwinterkalten Klima: im Norden 150 g TM/(m<sup>2</sup> a) und im Süden 500 g TM/(m<sup>2</sup> a), von denen jeweils 80 % nutzbar sind, also 0.6 bzw. 2 kg FM/(m<sup>2</sup> a). Der Verbrauch pro Rind liegt bei 65 kg FM/Tag. Der

Unterschied zum feuchtwinterkalten Klima besteht darin, dass diese Weiden nicht im Überschwemmungsgebiet liegen sondern bei Bedarf beregnet werden.

**Tab. 4.12** Benötigte Treibhausfläche im wintertrockenen Klima Dw

Pfad	Verbrauch in kg/a	Anteil Abfall	Ertrag in kg FM/(m <sup>2</sup> a)	benötigte Fläche in m <sup>2</sup>
Wurzelgemüse	240	0,2	5	1152
Obst, Fruchtgemüse	90	0,08	3	648
Blattgemüse	60	0,03	4	309
Summe im Norden				<b>2109</b>
Summe im Süden				<b>957</b>

**Tab. 4.13** Größe der Rinderherde bei wintertrockenem Klima Dw

Typ	jährliche Schlachtungen	Größe der Rinderherde
nördliche Zone ohne Treibhäuser	24	60
nördliche Zone mit Treibhäusern	18	45
südliche Zone mit Treibhäusern	10	25

**Tab. 4.14** Weiden in der wintertrockenen Klimazone

	Weide-Ertrag in kg/m <sup>2</sup>	Anzahl der Tiere	Flächenbedarf in km <sup>2</sup>
Norden ohne Treibhäuser	0,6	60	2,37
Norden mit Treibhäusern	0,6	45	1,78
Süden mit Treibhäusern	2	25	0,30

**Tab. 4.15** Felder im südlichen Teil der wintertrockenen Klimazone

	Ertrag	Anteil Abfall	Verbrauch	Platzbedarf
	kg/m <sup>2</sup>		kg/Kopf	m <sup>2</sup>
Gerste	0,4	0	110	5500
Kartoffeln	3,5	0,2	100	686
Kohl	2	0,5	200	3000
Summe				<b>9186</b>

Der hier berechnete hohe Wasserbedarf entspricht insbesondere im Norden zur Zeit nicht den Tatsachen. Die Bevölkerungsdichte ist so gering, dass keine Anstrengungen unternommen werden, die nördlichen Weideländer im Sommer zu beregnen; statt dessen wird die Weidefläche ausgeweitet. Daher wird der Wasserbedarf zusätzlich für den Fall angegeben, dass die Weiden nicht beregnet werden.

**Tab. 4.16** Wasserbedarf in der wintertrockenen Klimazone

	nördliche Zone, keine Treibhäuser	nördliche Zone, mit Treibhäusern	südliche Zone
Bedarf zum Trinken (m <sup>3</sup> )	16	16	16
Viehtränke (m <sup>3</sup> )	1644	1233	685
Bedarf im Haushalt (m <sup>3</sup> )	731	731	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m <sup>3</sup> )	0	1041	465
Bedarf zur Beregnung der Felder (m <sup>3</sup> )	0	0	1837
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m <sup>3</sup> )	142200	106800	60000
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> )	<b>144591</b>	<b>109820</b>	<b>63733</b>
Wasserverbrauch, wenn Weiden nicht beregnet werden (m <sup>3</sup> )	<b>2391</b>	<b>3020</b>	<b>3733</b>

## 4.6 Feuchtgemäßigtes Klima (Cf)

### 4.6.1 Klimatische Situation

Feuchtgemäßigtes Klima (Cf) wird im heutigen Europa ungefähr zwischen dem 48. und dem 60. Breitengrad angetroffen. Es zeichnet sich aus durch eine Vegetationsperiode von 120 bis 200 Tagen, während der das Klima humid ist. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt zwischen 8 und 12° C, die mittlere Temperatur im wärmsten Monat zwischen 15 und etwas über 20° C. Dabei nehmen einerseits die Niederschläge von Westen nach Osten ab, andererseits nehmen die jahreszeitlich bedingten Temperaturunterschiede von Westen nach Osten zu. Antrieb dieser Unterschiede ist die Entfernung zum Meer. Ein deutlicher Unterschied zu den bisher behandelten klimatischen Situationen liegt in den täglichen Temperaturunterschieden. Die tägliche Temperaturschwankung ist um so größer, je weiter südlich der Standort liegt. In der Zone zwischen dem 50. und 55. Breitengrad, wo das deutsche Endlager während der Betrachtungszeit von 1 Mio. Jahren immer liegen wird, entspricht sie dem heute im feuchtgemäßigten Klima beobachtetem Wert auch dann ungefähr, wenn sich das Klima ändert.

Die nachstehenden Klimadiagramme zeigen die oben genannten Einflüsse: Abbildung 4.11 (Hannover, Deutschland, 52.5. Breitengrad /UKA 98, STA 95, STA 96, STA 97, STA 98, STA 99/), 4.12 (Edinburgh, Schottland, 56. Breitengrad, hochozeanisch /UKA 98/), 4.13 (Paris, Frankreich, 48. Breitengrad, feucht und warm /UKA 98/), 4.14 (Prag, Tschechien, 50. Breitengrad, stärker kontinental /UKA 98/).

In der konkreten Situation der Nachbetriebsphase eines Endlagers in Deutschland wird der Antrieb für den Grad der Kontinentalität des Klimas nicht die Entfernung zum Meer sein, sondern die Temperatur des Meerwassers. Dies wirkt ebenfalls auf die mittlere Landtemperatur. Es wird angenommen, dass ein feuchtgemäßigtes Klima am Standort der Endlager nicht wesentlich kontinentaler als in Prag und nicht wesentlich ozeanischer als in Paris sein wird. Die meisten der in /MÜL 81/ beschriebenen Subklimate werden daher hier nicht erwartet.

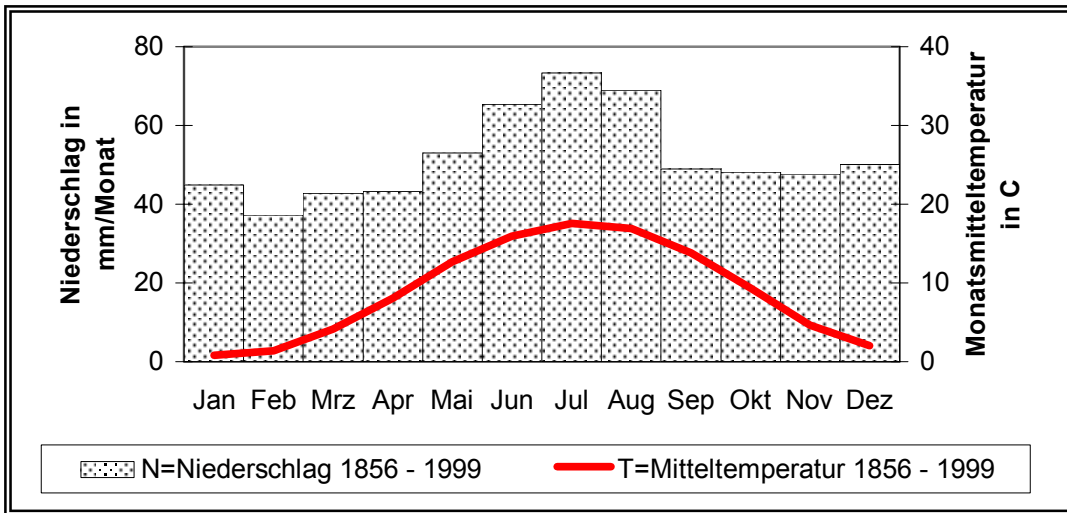
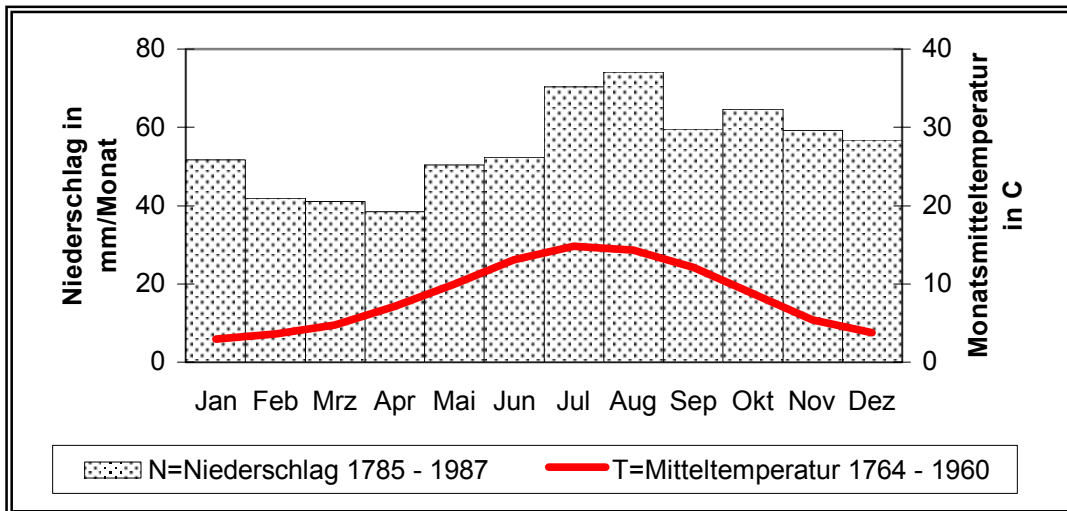


Abb. 4.11 Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Hannover

Abb. 4.12 Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Edinburgh



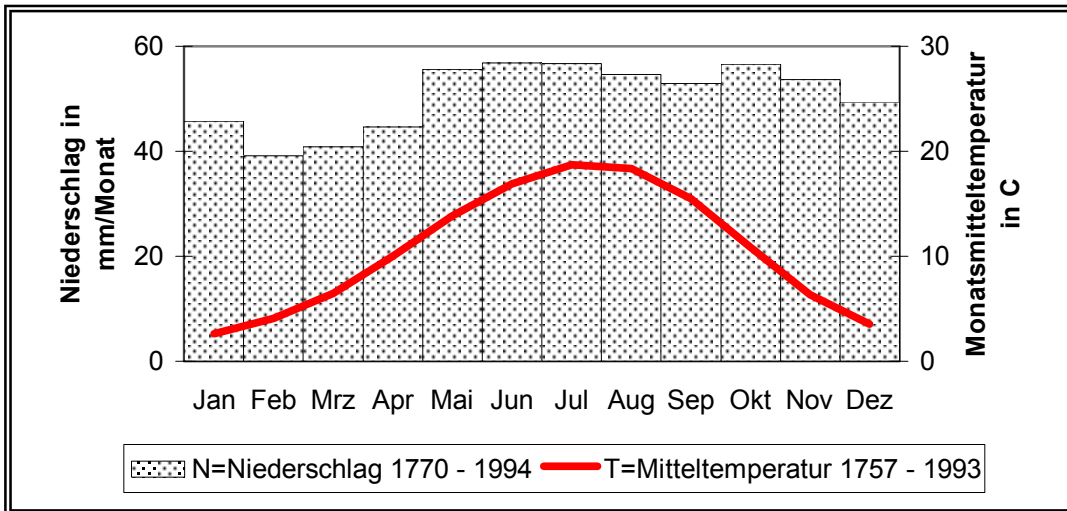
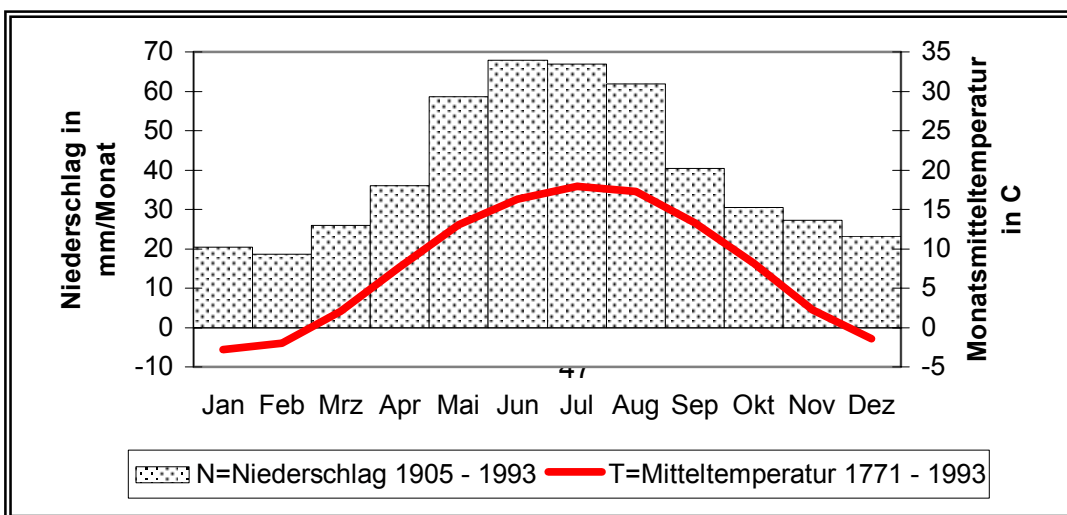


Abb. 4.13 Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Paris

Abb. 4.14 Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Prag

Aus den Angaben für das Klima kann der Beregnungsbedarf nach der in Abschnitt 4.3.6 beschriebenen Methode abgeleitet werden. Da die Vegetationszeit hier länger als im Klima Df (kaltwinterfeuchtes Klima) ist, werden einige Pflanzen in Frühbeeten und in warmen trockenen Herbstperioden zusätzliches Wasser benötigen. Es wird angenommen, dass in den Monaten Oktober bis März bei Monatsmitteltemperaturen über 5°C soviel beregnet wird, dass die Monatssumme aus natürlichem Niederschlag und Beregnung in l/m<sup>2</sup> der doppelten Monatsmitteltemperatur in C entspricht. Der Beregnungsbedarf geht aus Abbildung 4.15 (Edinburgh und Prag) und 4.16 (Hannover

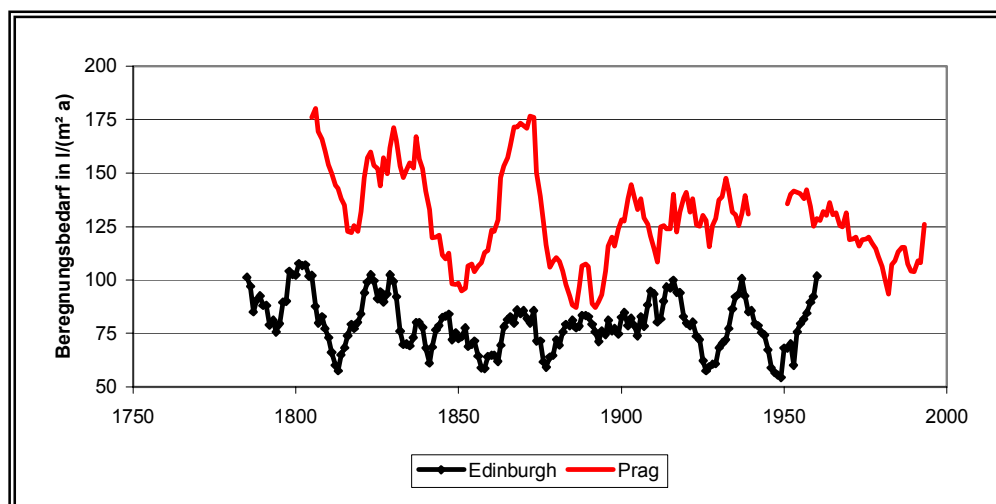




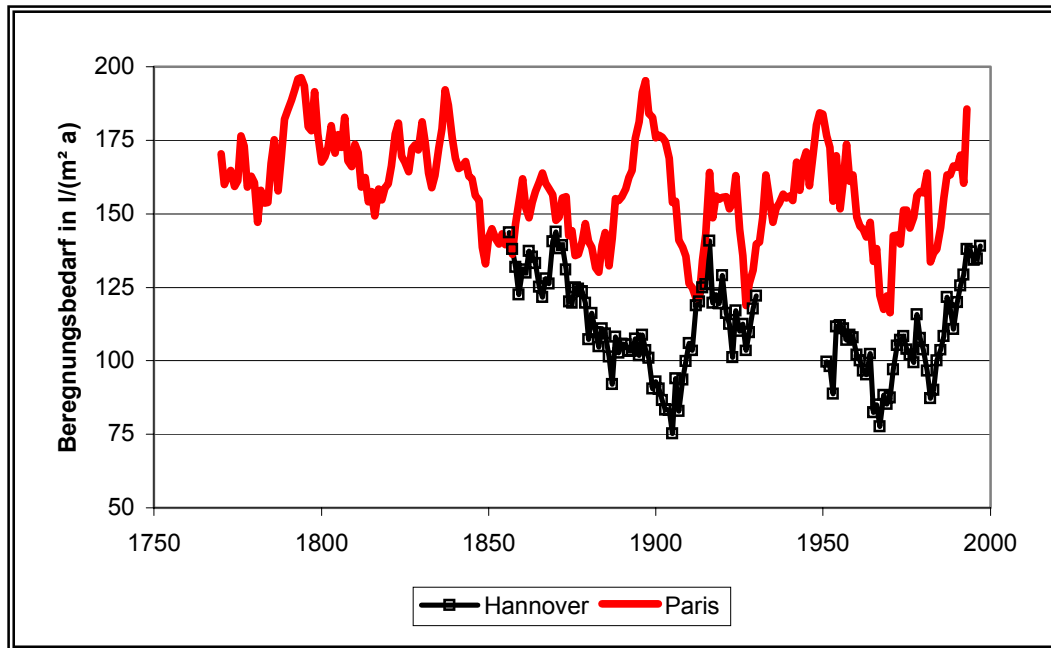
und Paris) hervor und beträgt im Mittel über die Beobachtungsjahre für Edinburgh 80 l/(m<sup>2</sup> a), für Hannover 110 l/(m<sup>2</sup> a), für Prag 130 l/(m<sup>2</sup> a) und für Paris 160 l/(m<sup>2</sup> a). Diese Zahlen lassen sich vergleichen mit Erhebungen für Deutschland (alte Länder). In /RUH 85/ werden Berechnungsmengen empfohlen, die je nach Kultur bei ca. 60 bis 400 l/(m<sup>2</sup> a) auf leichten Böden und 0 bis 200 l/(m<sup>2</sup> a) auf schweren Böden liegen. Nach /WOL 87/ beträgt das klimatische Feuchtigkeitsdefizit in Deutschland (alte Länder) ungefähr 65 bis 250 mm/a. Die mittlere Beregnung der beregneten Flächen lag demgegenüber nach den Erhebungen in /WOL 87/ in den Jahren 1976 und 1982 bei jeweils 75 mm/a; die Angaben für Niedersachsen lagen bei 81 und 79 mm/a (berechnet aus Einzelangaben). Nach dem oben beschriebenen Berechnungsverfahren ergeben sich für diese beiden Jahre für die Wetterstation Hannover 86 und 90 mm Beregnungsbedarf. Damit werden die beobachteten Werte für die Beregnung fast exakt getroffen; es wird davon ausgegangen, dass das theoretische Verfahren den Beregnungsbedarf auch in anderen Klimagebieten einigermaßen zutreffend wiedergibt.

Tatsächlich beregnet wird aber nur auf etwa 2 %, in Niedersachsen auf 6 % der Landwirtschaftsfläche (berechnet aus der beregneten Fläche nach /WOL 87/ und der Landwirtschaftsfläche nach /STA 97/). Aus Erhebungen über den Wasserverbrauch /UBA 97/ und die landwirtschaftliche Nutzfläche /STA 97/ in Deutschland ergibt sich eine mittlere jährliche Beregnung von 11 l/m<sup>2</sup> landwirtschaftliche Nutzfläche. Diese Zahl berücksichtigt die trockenen Gebiete in den neuen Ländern und auch die Beregnung in Gewächshäusern. Insgesamt bleibt die tatsächliche Beregnung deutlich hinter dem theoretisch ermittelten Bedarf zurück.

**Abb. 4.15** Beregnungsbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone: Edinburgh, Prag



**Abb. 4.16** Beregnungsbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone: Hannover, Paris



Die zeitliche Verteilung des Beregnungsbedarfes an den Standorten geht aus Tabelle 4.17 hervor. An allen vier Standorten entfällt etwa 90 % des gesamten Bedarfes auf vier Monate.

**Tab. 4.17** Verteilung des Beregnungsbedarfes im feuchtgemäßigten Klima

	Edinburgh	Hannover	Prag	Paris
	%	%	%	%
JAN	0	0	0	0
FEB	0	0	0	0
MAR	0	0	0	1
APR	3	2	2	3
MAY	14	17	14	12
JUN	38	31	27	28
JUL	20	22	23	25
AUG	19	20	23	25
SEP	5	7	8	5
OCT	0	1	2	1
NOV	0	0	0	0
DEC	0	0	0	0

#### 4.6.2 Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna

Die natürliche Vegetation besteht aus sommergrünen Laub- und Mischwäldern. Auf Grund der intensiven Nutzung durch den Menschen wurde die Vegetation jedoch weitgehend umgeformt: Felder und Weiden herrschen vor, in den Wäldern werden zu einem bedeutenden Teil auch Nadelbäume angebaut.

Die heutigen Böden im Norden und Nordosten dieser Klimazone sind erst nach dem Ende der letzten Eiszeit entstanden. Ein wichtiger Faktor bei der Bodenbildung ist die Humidität. In ozeanischen Lagen herrschen Moor- und Wattböden sowie Braunerden vor, in etwas kontinentaleren Lagen sind bei niedrigen Temperaturen (z. B. Hannover) Podsole entstanden, bei höheren (z. B. Paris) Braunerden (Cambisole), während für semihumide Gebiete (z. B. Prag) Tschernoseme und Wiesenböden typisch sind /MÜL 81/. Talbildung ist auf Grund der hohen Niederschläge ein häufig beobachtetes Phänomen; in den Tälern wird häufig Pseudogley und Auenlehm angetroffen /MÜL 81/.

Die Bildung eines reifen morphologisch und chemisch differenzierten Bodenprofils ist ein Langzeitprozess und erfordert größenordnungsmäßig einen Zeitraum von Jahrtausenden, wie ein Blick auf die Entwicklung des Bodens in Mitteleuropa seit dem Ende der Eiszeit /HEN 97/ zeigt. So lange ist das Klima aber selten konstant.

Auf kalkhaltigen lössartigen Sedimenten, die während eines Tundrenklima durch Erosion aperer Flächen mit anschließender Verfrachtung mit dem Winde und Deposition auf Pflanzenbewachsenen Unterlagen entstanden waren, bildeten sich noch unter eiszeitlichen Bedingungen erste Böden, nämlich Syrosemi und Pararendzinen. Beides sind Übergangsformen, aus denen sich schnell echte Böden mit einer Humusschicht über dem mineralischen Unterboden entwickelten. Während der plötzlichen Erwärmung vor ca. 11 000 bis 12 000 Jahren (Allerödzeit) gediehen Birken und Kiefern, bei deren Zersetzung mächtige Humusschichten zurückblieben, die in der anschließenden Abkühlungsphase (jüngere Dryas mit Tundrenvegetation, vor ca. 10 700 Jahren) größtenteils wieder abgebaut wurden; bei der neuerlichen Erwärmung (etwa 9 000 bis 4 500 vor heute) kam es zur Ausbildung von Waldsteppen und hiermit verbunden zu Tschernosemböden mit starker regenwurmreicher Humusschicht; in den ersten 2 000 Jahren dieser warmen Periode war es trockener als heute, später aber fiel mehr Niederschlag. Dabei wurde der Kalk aus dem Tschernosem langsam aus-

gewaschen und im Unterboden angereichert. In dieser Zeit begann der Ackerbau durch den bronzezeitlichen Mitteleuropäer. Während der frühen Eisenzeit kam es zu einer Abkühlung bei höheren Niederschlägen und vermehrten Stürmen. Die Tschernoseme wurden folglich noch schneller degradiert. In stärker kontinental geprägten Gegenden blieben Reste bis heute erhalten, in stärker humiden Gegenden kam es dagegen zu Tondurchschlammung, Lessivierung und schließlich zu Pseudovergleyung, insbesondere wenn unter der Lössschicht wasserdurchlässige Gesteinsschichten, z. B. Kies anstanden. In noch humideren Gegenden schritt dieser Prozess weiter fort bis zur Podsolierung, was durch die verschiedenen Kälteperioden, in denen Laubbäume zurückgedrängt und durch Nadelbäume ersetzt wurden, noch begünstigt wurde. Zur Podsolbildung kann es auch über vielen anderen Unterlagen kommen.

Braunerden entstehen unter ozeanisch getönten gemäßigt kühlen Klimabedingungen unter Laub- und Mischwäldern. Der humusreiche Boden ist nur schwach sauer, daher werden die leicht-löslichen Erdalkali-Ionen ausgewaschen, aber nicht der Ton. Deshalb unterbleibt die deutliche Profildifferenzierung der Podsolböden. Ein typisches Bodenprofil für Braunerden besteht aus einem starken Mullhorizont, der langsam in einen Braunhorizont übergeht, der wiederum langsam in den mineralischen Unterboden übergeht. Braunerden über kalziumreichen Gesteinen gehören zu den ertragreichsten Böden, aber Braunerden über basenarmen Sandsteinen tragen nur anspruchslose Feldfrüchte.

Die menschliche Besiedlung in den letzten Jahrtausenden hat weiter zur Umformung der Böden beigetragen. So entwickelten sich nach Rodungen häufig Heidegesellschaften, unter denen nassere und saurere Böden entstanden, nassere Böden, weil die Evapotranspiration in Heiden geringer ist als in Wäldern /MÜL 81/, saurere Böden, weil bei der Zersetzung von Heidekraut Fulvosäuren entstehen. Man kann davon ausgehen, dass langfristige ackerbauliche Nutzung den Boden ebenfalls verändern wird.

#### **4.6.3 Gewinnung der Nahrungsmittel**

Die landwirtschaftliche Klassifizierung erfolgt nach Engelbrecht. Dabei stimmen die Gebiete nach Engelbrecht nicht mit den Gebieten der Köppen-Geiger-Klassifikation

überein; so gehören sowohl die südlichen feuchtwinterkalten als auch die feuchtgemäßigten Gebiete Eurasiens überwiegend zur Haferzone /MÜL 81/.

Wichtigste Feldfrüchte sind Getreide, Kartoffeln und Rüben /MÜL 81/. Dazu treten zahlreiche Gemüse- und Obstarten. Diese werden zum Teil in Treibhäusern erzeugt. Lieferanten von tierischem Protein sind einerseits die Milchkuh, andererseits das Hausschwein, außerdem Rinder und Geflügel. Der Fischzucht und der Jagd kommt nur eine untergeordnete Bedeutung zu.

In Tabelle 4.18 werden drei grob vereinfachte Nahrungskörbe zusammengestellt. Die Unterschiede beruhen auf dem Ausmaß des Fleischverzehr und der Nutzung von Treibhäusern. Die verschiedenen Fleischarten werden als Rindfleisch berechnet, Getreide wird als Weizen zu verstanden, Treibhausgemüse als Tomaten und Kopfsalat, Freilandgemüse als Spinat (Blattgemüse) und Äpfel (Obst). Als Energiebedarf werden täglich 3000 kcal. angenommen, davon werden 400 kcal. durch Rübenzucker gedeckt.

Einige Vergleichszahlen für den jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch im Europa der Zehn (1980 bis 1982), aber ohne Italien und Griechenland, sind /RUH 85/:

Getreide	60 kg (Niederlande) bis 76 kg (Frankreich)
Kartoffeln	68 kg (Dänemark) bis 111 kg (Irland)
Milch, Milchprodukte	105 l (BRD) bis 204 l (Irland)
Fleisch (gesamt)	74 kg (Vereinigtes Königreich) bis 110 kg (Frankreich)
Gemüse, Obst, Wein	117 kg bzw. l (Dänemark) bis 279 kg bzw. l (Frankreich)
Zucker	35 kg (Frankreich, Belgien, Luxemburg) bis 44 kg (Dänemark)

Diese Verzehrsmengen beziehen sich auf die Gesamtbevölkerung, schließen also Frauen und Männer, Kinder und Greise ein. Der Nahrungskorb der Referenzperson, eines Erwachsenen, muss hiervon abweichen.

In /BAGS 95/ werden alters- und geschlechtsspezifische Angaben zur Ernährung in Deutschland gemacht. Danach ergeben sich für Männer (17 bis 64 Jahre) 89 kg Getreide, 44 kg Kartoffeln, 84 kg Milch, 84 kg Fleisch und Eier, 115 kg Gemüse, Obst und Wein, 9 kg Pflanzenfett, 10 kg Zucker. Die gesamte Energiezufuhr lässt sich mit Hilfe der Kalorientabelle in /SOU 81/ zu 2800 kcal/Tag berechnen.

**Tab. 4.18** Nahrungskörbe im feuchtgemäßigten Klima

		Was- ser	Kartof- feln	Obst	Spinat	Weiz- en	Toma- ten	Salat	Milch	Fleisch	Sum- me
Abfall	Anteil	0	0,2	0,08	0,15	0,00	0,04	0,32	0,00	0,16	
Wasser	%	100	77,8	85,3	91,6	13,2	94,20	95,00	87,50	60,0	
Energie	kcal./ 100 g	0	81,2	49,9	20,9	321	15,78	12,64	65,43	271	
Fett	%	0	0,11	0,40	0,30	2,0	0,21	0,22	3,78	21,7	
Eiweiß	%	0	2,05	0,34	2,52	11,7	0,95	1,25	3,33	17,5	
Kohle- hydrate	Anteil	0	18,5	12,6	3,4	69,3	3,28	2,17	4,65	0,0	
<b>Standard</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>800</b>	<b>130</b>	<b>150</b>	<b>70</b>	<b>110</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>160</b>	<b>110</b>	
Energie	kcal/d	0	289	205	40,05	966	0	0	287	814,74	2601
Fett	g/d	0	0,392	1,64	0,575	6,0	0	0	16,6	65,352	91
Eiweiß	g/d	0	7,296	1,4	4,83	35,2	0	0	14,6	52,7	116
<b>wenig Fleisch</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>800</b>	<b>140</b>	<b>140</b>	<b>50</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>130</b>	<b>70</b>	
Energie	kcal/d	0	311,2	191	28,6	1317	0	0	233	518,47	2600
Fett	g/d	0	0,42	1,53	0,41	8,21	0	0	13,5	41,6	66
Eiweiß	g/d	0	7,9	1,30	3,45	48	0	0	11,9	33,54	106
<b>mit Treib- häusern und Fleisch</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>800</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>160</b>	<b>120</b>	
Energie	kcal/d	0	266,8	205	17,2	878	34,6	24,2	287	888,8	2601
Fett	g/d	0	0,36	1,64	0,25	5,48	0,46	0,42	16,6	71,3	96
Eiweiß	g/d	0	6,74	1,40	2,07	32,0	2,1	2,4	14,6	57,5	119

#### 4.6.4 Expositionspfade

Die Wasserrförderung erfolgt über einen Brunnen. Hier wird Trink- und Tränkwasser entnommen, ebenso Beregnungswasser für landwirtschaftlich genutzte Flächen und

Weiden sowie für die Kulturen in den Treibhäusern. Nach Gebrauch wird überschüssiges Wasser in einem Vorfluter abgeleitet; auf Grund der Verdünnung ist die Radionuklidkonzentration im Vorfluter aber so gering, dass die hier anschließenden Pfade: Fischverzehr, Aufenthalt am Ufer und landwirtschaftliche Nutzung des Überschwemmungsgebietes außer Acht bleiben können. Damit ergeben sich die in Abbildung 4.9 für wintertrockenes Klima dargestellten Ingestionspfade, außerdem die weiteren Expositionspfade:

- Externe Exposition bei Aufenthalt im Treibhaus und auf berechneten Feldern und Weiden
- Interne Exposition durch Inhalation bei Aufenthalt im Treibhaus und auf berechneten Feldern und Weiden
- Interne Exposition durch Ingestion von Erde aus berechneten Feldern und Treibhäusern mit schlecht gewaschener Nahrung.

#### 4.6.5 Platz- und Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft

Die Erträge sind in diesem Szenario höher als im feuchtwinterkalten Szenario, da die Vegetationszeit länger ist. Der Ertrag von Obst und Fruchtgemüse im Treibhaus ist ebenfalls höher als im feuchtwinterkalten Szenario, weil die meisten Früchte gut im Freiland gedeihen und daher im Treibhaus überwiegend Kulturen mit sehr hohem Ertrag wie Tomaten und Gurken gezogen werden. Die Tabellen 4.19 bis 4.22 geben Auskunft über den Platzbedarf, in Tabelle 4.23 wird der Wasserbedarf ermittelt.

**Tab. 4.19** Benötigte Treibhausfläche im feuchtgemäßigten Klima

Pfad	Verbrauch in kg/a	Anteil Abfall	Ertrag in kg FM/(m <sup>2</sup> a)	benötigte Fläche in m <sup>2</sup>
Obst, Fruchtgemüse	80	0,04	8	208
Blattgemüse	70	0,32	4	462
Summe				<b>670</b>

**Tab. 4.20** Größe der Rinderherde im feuchtgemäßigten Klima

Typ	jährliche Schlachtungen	Größe der Rinderherde
Standardkost	9	23
fleischreduzierte Kost	6	15
Benutzer von Treibhäusern	10	25

Die Erträge der Weiden hängen u. a. von der Dauer der Vegetationszeit ab. Diese lässt sich berechnen und beträgt für Edinburgh ca. 140 Tage (aus Angaben in /UKA 98, SCH 94/), für Prag ca. 155 Tage (aus Angaben in /UKA 98/), für Hannover ca. 165 Tage (aus Angaben in /UKA 98/) und für Paris ca. 190 Tage (aus Angaben in /UKA 98, SCH 94/).

Bei einem nach /BMU 90/ angenommenen für die Kuh nutzbaren Ertrag von monatlich 850 g FM/m<sup>2</sup> ergeben sich folgende Erträge: Edinburgh: 4 kg/(m<sup>2</sup> a), Prag: 4.4 kg/(m<sup>2</sup> a), Hannover: 4.7 kg/(m<sup>2</sup> a) und Paris: 5.4 kg/(m<sup>2</sup> a). Zum Vergleich: der Ertrag von guten gedüngten Talwiesen in Deutschland liegt bei 3.5 bis 4.5 kg/(m<sup>2</sup> a), der Ertrag der besten gedüngten Wiesen bei 5 bis 7.5 kg/(m<sup>2</sup> a) /RUH 85/. Der Verbrauch pro Rind beträgt 65 kg FM/Tag /BMU 01/.

**Tab. 4.21** Weiden in der feuchtgemäßigten Klimazone

Ort		Ertrag der Weiden in kg/(m <sup>2</sup> a)	Anzahl der Tiere	Flächen- bedarf in m <sup>2</sup>
Edinburgh	Standardkost	4	23	136512
	fleischreduzierte Kost	4	15	89030
	Benutzer von Treibhäusern	4	25	148383
Hannover	Standardkost	4,7	23	116181
	fleischreduzierte Kost	4,7	15	75770
	Benutzer von Treibhäusern	4,7	25	126283
Prag	Standardkost	4,4	23	124102
	fleischreduzierte Kost	4,4	15	80936
	Benutzer von Treibhäusern	4,4	25	134893
Paris	Standardkost	5,4	23	101120
	fleischreduzierte Kost	5,4	15	65948
	Benutzer von Treibhäusern	5,4	25	109913

Angaben über die Erträge von Getreide, Zuckerrüben und Kartoffeln in den Ländern Europas liegen in /RUH 85/ vor. Die Erträge scheinen kaum vom Klima beeinflusst zu werden, sondern eher von der Bodenqualität und der Düngung. Darum wird hier von einheitlichen Erträgen, die in Anlehnung an /BMU 90, RUH 85, TSC 64/ geschätzt



werden, ausgegangen. Die Zuckerkonzentration in der Zuckerrübe beträgt etwa 12 %, bezogen auf die Frischmasse /GEI 88/.

Bei der Berechnung des Wasserbedarfs werden zwei Varianten beachtet, nämlich eine Variante mit Beregnung von Weiden und eine ohne. Der Flächenbedarf ist dann zwar größer, doch geht er nicht in die Berechnung ein, wenn keine Beregnung erfolgt.

**Tab. 4.22** Felder in der feuchtgemäßigten Klimazone

		Ertrag	Anteil Abfall	Verbrauch	Platzbedarf
		kg/m <sup>2</sup>		kg/Kopf	m <sup>2</sup>
Standard- kost	Weizen	0,5	0	110	4400
	Kartoffeln	3,5	0,2	130	891
	Obst etc.	2	0,04	150	1560
	Zucker	0,6	0	35	1167
	Kohl	3	0,32	70	616
	Summe				<b>8634</b>
fleisch- reduzierte Kost	Weizen	0,5	0	150	6000
	Kartoffeln	3,5	0,2	140	960
	Obst etc.	2	0,04	140	1456
	Zucker	0,6	0	35	1167
	Kohl	3	0,32	50	440
	Summe				<b>10023</b>
Benutzer von Treib- häusern	Weizen	0,5	0	100	4000
	Kartoffeln	3,5	0,2	120	823
	Obst etc.	2	0,04	150	1560
	Zucker	0,6	0	35	1167
	Kohl	3	0,32	30	264
	Summe				<b>7814</b>

**Tab. 4.23a** Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Edinburgh)

	Standardkost	fleischreduzierte Kost	Benutzer von Treibhäusern
Bedarf zum Trinken (m <sup>3</sup> )	16	16	16
Viehtränke (m <sup>3</sup> )	630	411	685
Bedarf im Haushalt (m <sup>3</sup> )	731	731	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m <sup>3</sup> )	0	0	276
Bedarf zur Beregnung der Felder (m <sup>3</sup> )	691	802	625
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m <sup>3</sup> )	10921	7122	11871
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> )	<b>12988</b>	<b>9082</b>	<b>14203</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> ), wenn Weiden nicht beregnet werden	<b>2067</b>	<b>1959</b>	<b>2333</b>

**Tab. 4.23b** Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Hannover)

	Standardkost	fleischreduzierte Kost	Benutzer von Treibhäusern
Bedarf zum Trinken (m³)	16	16	16
Viehtränke (m³)	630	411	685
Bedarf im Haushalt (m³)	731	731	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m³)	0	0	276
Bedarf zur Beregnung der Felder (m³)	972	1103	860
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m³)	12780	8335	13891
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m³)	<b>15128</b>	<b>10595</b>	<b>16458</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m³), wenn Weiden nicht beregnet werden	<b>2348</b>	<b>2260</b>	<b>2567</b>

**Tab. 4.23c** Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Prag)

	Standardkost	fleischreduzierte Kost	Benutzer von Treibhäusern
Bedarf zum Trinken (m³)	16	16	16
Viehtränke (m³)	630	411	685
Bedarf im Haushalt (m³)	731	731	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m³)	0	0	276
Bedarf zur Beregnung der Felder (m³)	1122	1303	1016
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m³)	16133	10522	17536
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m³)	<b>18632</b>	<b>12982</b>	<b>20260</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m³), wenn Weiden nicht beregnet werden	<b>2499</b>	<b>2460</b>	<b>2723</b>

**Tab. 4.23d** Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Paris)

	Standardkost	fleischreduzierte Kost	Benutzer von Treibhäusern
Bedarf zum Trinken (m³)	16	16	16
Viehtränke (m³)	630	411	685
Bedarf im Haushalt (m³)	731	731	731
Bedarf zur Beregnung der Treibhäuser (m³)	0	0	276
Bedarf zur Beregnung der Felder (m³)	1381	1604	1250
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m³)	16179	10552	17586
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m³)	<b>18937</b>	<b>13313</b>	<b>20544</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m³), wenn Weiden nicht beregnet werden	<b>2758</b>	<b>2761</b>	<b>2958</b>

## 4.7 Etesienklima (Es)

### 4.7.1 Klimatische Situation

Etesienklima (Es), auch sommertrockenes warmgemäßigtes Klima genannt, herrscht in Europa im Mittelmeerraum vor. Im Sommer liegt dies Gebiet im Einflussbereich der subtropischen Hochdruck- und Passatzzone, im Winter in der Westwindzone /ROT 93/.

Das Klima wird gekennzeichnet durch eine mittlere Jahrestemperatur von 13 bis 18° C, wobei der wärmste Monat 22 bis 28° C warm sein kann. Die Temperaturen im Winter unterscheiden sich stärker, sie liegen zwischen + 13° C in hochozeanischen Gebieten und unter 0° C in kontinentalen Lagen /SCH 94/. Der Niederschlag fällt überwiegend im Winter, wobei insgesamt mehr Niederschlag als im feuchtgemäßigten Klima fallen kann /SCH 94/.

Klimadiagramme für Etesienklima zeigen die Abbildungen 4.17 (Mailand, Übergang vom feuchtgemäßigten Klima zum Etesienklima) und 4.18 (Rom), beide aus Angaben in /UKA 98/ berechnet; der Berechnungsbedarf geht aus Abbildung 4.19 hervor. Er beträgt im Mittel 190 l/(m<sup>2</sup> a) in Mailand und 380 l/(m<sup>2</sup> a) in Rom. Die Verteilung auf die Monate des Jahres ist in Tabelle 4.24 angegeben. Nahezu 90 % des gesamten Bedarfs konzentriert sich hier auf fünf Monate.

**Abb. 4.17** Klimadiagramm für den Übergang zum Etesienklima: Mailand

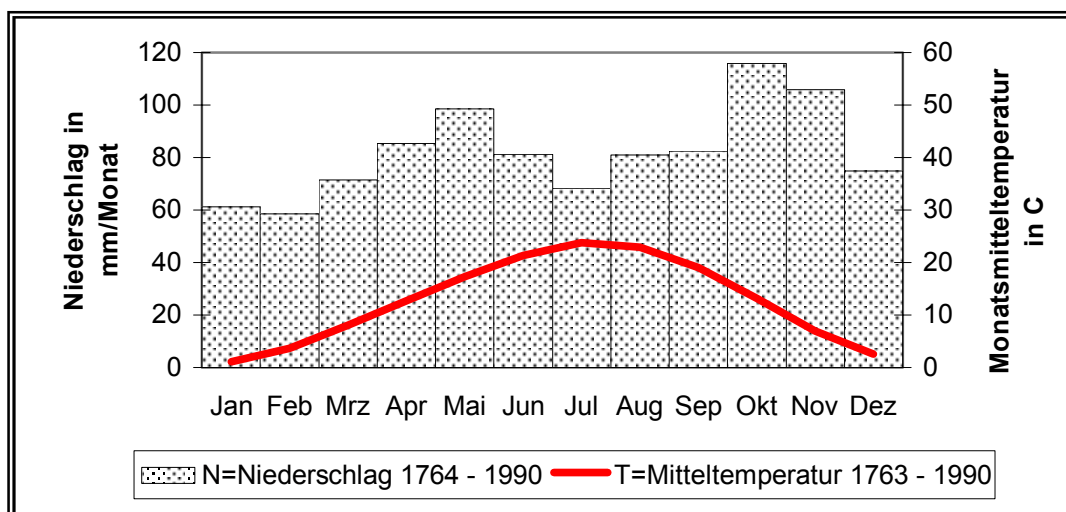
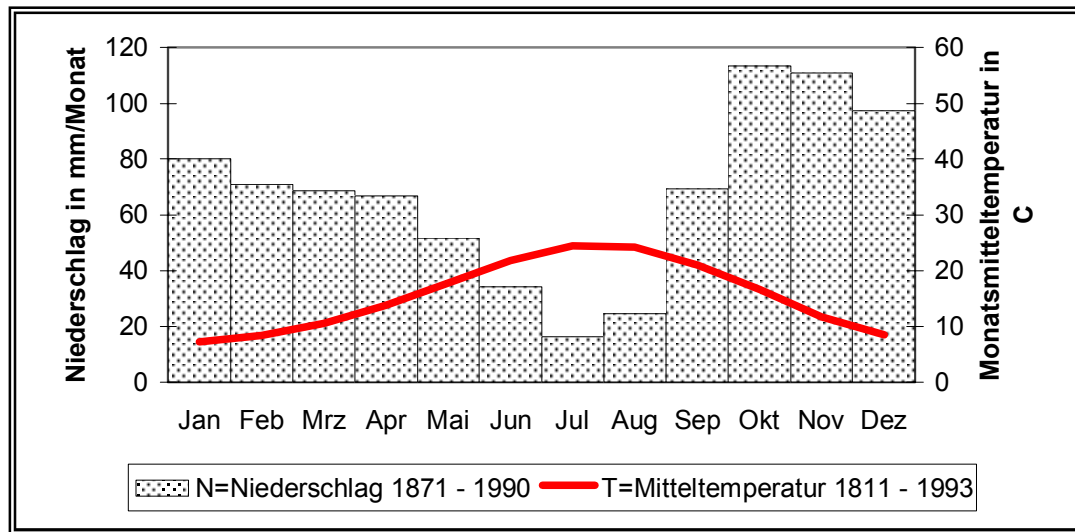


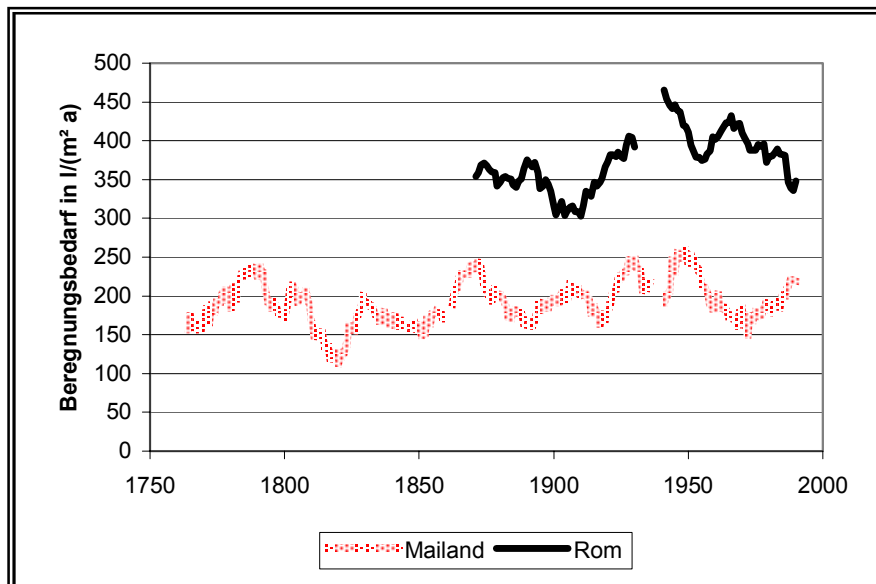
Abb. 4.18 Klimadiagramm für Etesienklima: Rom



**Abb. 4.19** Beregnungsbedarf im Etesienklima

**Tab. 4.24** Verteilung des Beregnungsbedarfes im Etesienklima

	Mailand	Rom		Mailand	Rom
	%	%		%	%
JAN	0	0	JUL	30	28
FEB	0	0	AUG	24	26
MAR	1	0	SEP	7	5
APR	2	2	OCT	1	1
MAY	9	11	NOV	0	0
JUN	28	26	DEC	0	0



#### 4.7.2 Auswirkungen des Klimas auf Boden, Flora und Fauna

Wenn mehr als fünf Monate humid sind, entwickeln sich sommergrüne Laubwälder, bei einer kürzeren Humiditätsphase Hartlaubsträucher, schließlich Trockensteppen-, Hartpolster-, Dornstrauch- und Sukkulantenformationen und bei noch kürzerer Regenzeit Zwergstrauch- und Horstgras-Trockensteppen /MÜL 81/.

Charakteristisch sind braune und rote mediterrane Böden /MÜL 81/. In der feuchten Jahreszeit überwiegen Vorgänge, bei denen Erdalkali-Ionen und auch Eisen in Lösung gehen; bei sommerlicher Trockenheit fallen diese Ionen wieder aus. Die rote

Farbe der Böden rührt vom Hämatit her. Diese Böden sind wegen der häufigen winterlichen Starkregenfälle und wegen der Trockenheitsbedingten Vegetationslosigkeit im Sommer besonders erosionsgefährdet. Ein weiteres Problem besteht in der Gefahr der Versalzung toniger Alluvialböden in den Tälern. Diese natürliche Neigung zur Versalzung wird durch Jahrtausende lange Beregnung noch verstärkt; oberhalb eines Salzgehaltes von 0.65 % werden diese Böden unfruchtbar, so dass dem durch Spülung und Tiefpflügen entgegengewirkt werden muss /ROT 93/.

#### **4.7.3 Landwirtschaft und Gewinnung von Nahrung**

Die natürliche Vegetation ist in Folge der mehrere Jahrtausende dauernden Nutzung durch den Menschen weitgehend zerstört worden. Engelbrecht klassifiziert das Gebiet als subtropische Gerstenzone /MÜL 81/. Charakteristisch ist der Ölbaum, dessen Verbreitung mit den Grenzen des Etesiengebietes übereinstimmt. Weitere Fruchtbäume sind Mandel- und Feigenbaum sowie der Weinstock. In den Ebenen herrscht Getreidebau vor, wobei früh reifende Getreidesorten keine Beregnung benötigen, wenn zwischen den Nutzungen ein- oder zweijährige Bracheperioden liegen. Bewässerungsfeldbau wird in Gärten betrieben, die durch Stockwerkanbau (z. B. Gemüse, Wein, Oliven und Pappeln auf demselben Boden) intensivst genutzt werden. Hier sind mehrere Ernten im Jahr möglich /ROT 93/. Wegen der allgemeinen Wasserknappheit im Sommer muss mit dem Beregnungswasser sparsam umgegangen werden.

Der stationären Viehwirtschaft kommt im allgemeinen keine große Bedeutung zu, denn auf Grund der sommerlichen Trockenheit kann das Vieh nur dann ganzjährig auf der Weide sein, wenn die Weiden beregnet werden. Da sich durch Beregnung von Gärten ein höheres Einkommen erzielen lässt, ist die Beregnung von Weiden jedoch nicht lukrativ. Die Lagerung von Futter ist derzeit nicht üblich, sondern Viehwirtschaft wird häufig nomadisch betrieben (Transhumanz), d. h. während des Sommers wird das Vieh in niederschlagreichere Gebiete getrieben oder weidet im Wald und auf brachliegenden Getreidefeldern /ROT 93/.

In Tabelle 4.25 werden die Nahrungskörbe für zwei verschiedene Ernährungstypen zusammengestellt. Beide sollen auch hier eine tägliche Energieaufnahme von 3000 kcal. erreichen, von denen 400 kcal. durch Rübenzucker gedeckt werden. Unterschiedlich ist der Grad der Nutzung tierischer Nahrungsmittel. Die verschiedenen

Fleischarten werden als Rindfleisch berechnet, Getreide ist als Weizen zu verstehen, Freilandgemüse als Kopfsalat (Blattgemüse) und Äpfel und Tomaten (Obst). Neu im Nahrungskorb ist Olivenöl, denn während in den bisherigen Szenarien genügend Milch und Fleisch enthalten war, um daraus auch den Verbrauch von Butter und anderen tierischen Fetten zu decken, ist unter den Bedingungen des Etesienklimas eine Zufuhr von pflanzlichen Fetten erforderlich.

Einige Vergleichszahlen für den jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch in Italien und Griechenland (1980 bis 1982) /RUH 85/ sind:

Getreide	82 bis 127 kg
Kartoffeln	41 bis 70 kg
Milch, Milchprodukte	85 bis 99 l
Fleisch (gesamt)	69 bis 76 kg
Gemüse, Obst, Wein	366 bis 395 kg bzw. l
Zucker	24 bis 31 kg

Diese Verzehrmenen beziehen sich auf die Gesamtbevölkerung, schließen also Frauen und Männer, Kinder und Greise ein.

**Tab. 4.25** Nahrungskörbe im Etesienklima

		Was- ser	Kartof- feln	Obst	Öl	Weizen	Toma- ten	Salat	Milch	Fleisch	Sum- me
Abfall	Anteil	0	0,2	0,08	0	0,00	0,04	0,32	0	16	
Wasser	%	100	77,8	85,3	0,2	13,20	94,20	95,00	87,50	60,0	
Energie	kcal./ 100 g	0	81,2	49,9	880	320,8	15,78	12,64	65,43	271	
Fett	%	0	0,11	0,40	99,6	2,00	0,21	0,22	3,78	21,7	
Eiweiß	%	0	2,05	0,34	2,52	11,70	0,95	1,25	3,33	17,5	
Kohle- hydrate	Anteil	0	18,5	12,6	0,2	69,30	3,28	2,17	4,65	0,0	
<b>Standard</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>1000</b>	<b>50</b>	<b>210</b>	<b>20</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>70</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	
Energie	kcal/d	0	111,2	287	482	878	47,5	24,2	179	592,54	2601
Fett	g/d	0	0,151	2,3	54,5	5,48	0,63	0,42	10,3	47,529	121
Eiweiß	g/d	0	2,806	1,95	1,38	32	2,86	2,4	9,1	38,3	91
<b>wenig Fleisch</b>	Ver- brauch in kg/a	<b>1000</b>	<b>80</b>	<b>230</b>	<b>20</b>	<b>130</b>	<b>110</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	
Energie	kcal/d	0	177,9	314	482	1142	47,5	34,6	107	296,27	2601
Fett	g/d	0	0,24	2,52	54,5	7,12	0,63	0,6	6,2	23,8	96
Eiweiß	g/d	0	4,5	2,14	1,38	41,6	2,86	3,42	5,5	19,16	81

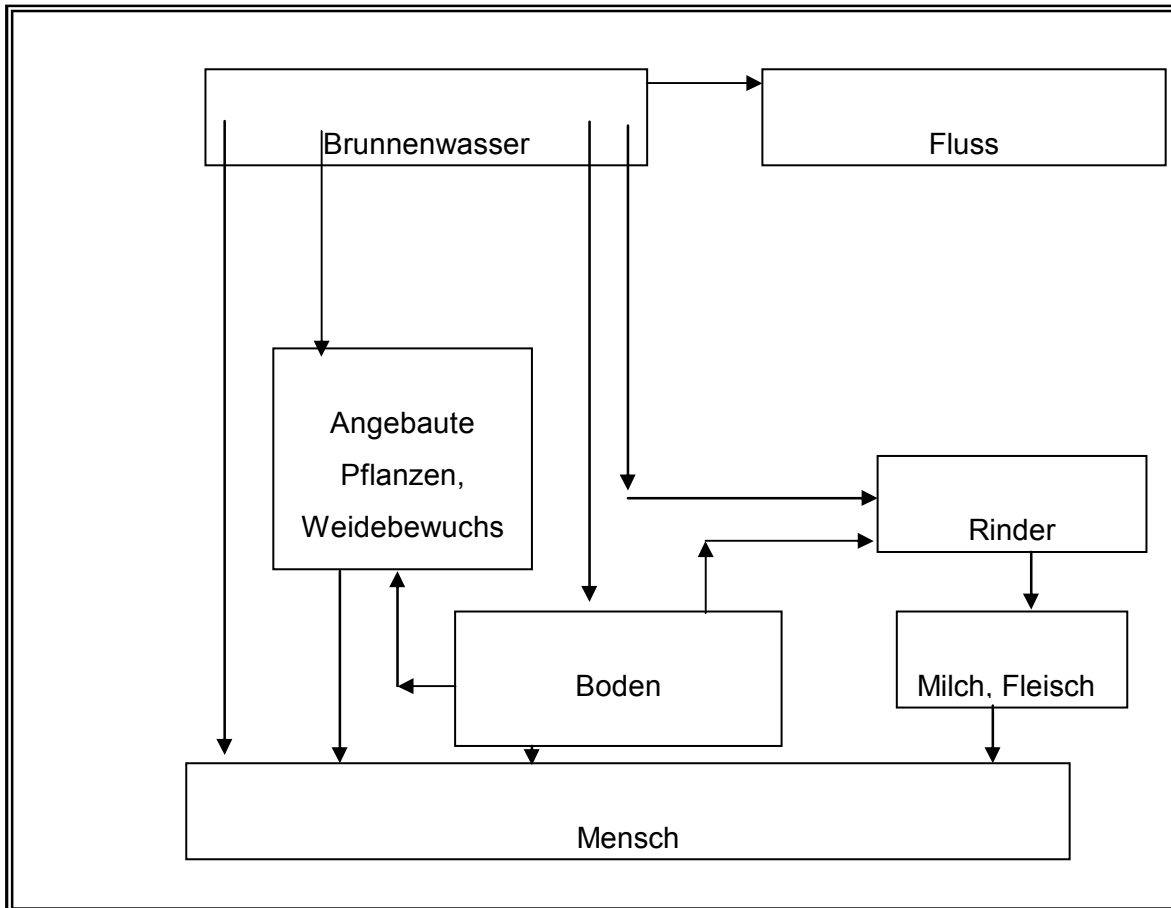
#### 4.7.4 Expositionspfade

Die Wasserförderung erfolgt über einen Brunnen. Hier wird Trink- und Tränkwasser entnommen, ebenso Beregnungswasser für landwirtschaftlich genutzte Flächen und Weiden. Nach Gebrauch wird überschüssiges Wasser in einem Vorfluter abgeleitet; auf Grund der Verdünnung ist die Radionuklidkonzentration im Vorfluter aber so gering, dass die hier anschließenden Pfade: Fischverzehr, Aufenthalt am Ufer und landwirtschaftliche Nutzung des Überschwemmungsgebietes außer Acht bleiben können. Damit ergeben sich die in Abbildung 4.20 gezeigten Ingestionspfade, außerdem die weiteren Expositionspfade:

- Externe Exposition bei Aufenthalt auf beregneten Feldern und Weiden
- Interne Exposition durch Inhalation bei Aufenthalt beregneten Feldern und Weiden

**Abb. 4.20** Ingestionspfade im Etesienklima





#### 4.7.5 Platz- und Wasserbedarf der Dorfgemeinschaft

Die Erträge sind in diesem Szenario höher als im feuchtgemäßigten Szenario, da die Vegetationszeit länger ist. Die Tabellen 4.26 bis 4.28 geben Auskunft über den Platzbedarf, in Tabelle 4.29 wird der Wasserbedarf ermittelt.

**Tab. 4.26** Größe der Rinderherde im Etesienklima

Typ	jährliche Schlachtungen	Größe der Rinderherde
Standardkost	8	20
fleischreduzierte Kost	4	10

Die Erträge der Weiden hängen von der Dauer der Vegetationszeit ab; es wird mit einem Jahresertrag von 10 kg (FM)/m<sup>2</sup> gerechnet. Eine Abhängigkeit vom Beregnungsbedarf wird nicht unterstellt, da es keinen Unterschied bedeuten sollte, ob die Feuchtigkeit über Regen oder Beregnung zugeführt wird. Der Futterbedarf liegt wie in den anderen Klimaten bei 65 kg (FM)/Tag, aber in Anbetracht der Wärme ist

den anderen Klimaten bei 65 kg (FM)/Tag, aber in Anbetracht der Wärme ist der Wasserbedarf der Tiere größer und wird auf 75 l für Fleischrinder und 100 l/Tag für Milchrinder geschätzt.

**Tab. 4.27** Weiden im Etesienklima

	Ertrag der Weiden in kg/m <sup>2</sup>	Anzahl der Tiere	Flächenbedarf in m <sup>2</sup>
Standardkost	10	20	47483
fleischreduzierte Kost	10	10	23741

Angaben über die Erträge von Getreide, Zuckerrüben und Kartoffeln in den Ländern Europas liegen in /RUH 85/ vor. Dabei unterscheiden sich die Erträge in den beiden Ländern mit Etesienklima deutlich von denen der Länder mit feuchtgemäßigem Klima. Die Zuckerkonzentration in der Zuckerrübe beträgt etwa 12 %, bezogen auf die Frischmasse /GEI 88/. Die jährlichen Erträge von Blattgemüse berücksichtigen, dass drei Ernten im Jahr möglich sind, die Erträge von Fruchtgemüse und Obst wurden in Anlehnung an die Erträge im Treibhaus /RUH 85/ geschätzt. Der Ölertrag wurde ermittelt auf Grund einer Ernte pro Baum von 60 kg Oliven /ENZ 80/, eines Pflanzabstands von 10 m (geschätzt) und eines Ölgehalts von 50 % /ENZ 80/.

**Tab. 4.28** Felder im Etesienklima

		Ertrag	Anteil Abfall	Verbrauch	Platzbedarf
		kg/m <sup>2</sup>		kg/Kopf	m <sup>2</sup>
Standard- kost	Weizen	0,25	0	100	8000
	Kartoffeln	2	0,2	50	600
	Obst etc.	6	0,04	230	797
	Olivenöl	0,3	0	20	1333
	Zucker	0,6	0	27	900
	Salat	5	0,32	70	370
	Summe				12000
	zu berechnen				4000
fleisch- reduzierte Kost	Weizen	0,25	0	130	10400
	Kartoffeln	2	0,2	90	1080
	Obst etc.	6	0,04	280	971
	Olivenöl	0,3	0	20	1333
	Zucker	0,6	0	27	900
	Salat	5	0,32	80	422
	Summe				15106
	zu berechnen				4706

**Tab. 4.29a** Wasserbedarf im Übergangsgebiet zum Etesienklima (Standort Mailand)

	Standardkost	fleischreduzierte Kost
Bedarf zum Trinken (m <sup>3</sup> )	20	20
Viehtränke (m <sup>3</sup> )	731	365
Bedarf im Haushalt (m <sup>3</sup> )	731	731
Bedarf zur Beregnung der Felder (m <sup>3</sup> )	760	894
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m <sup>3</sup> )	9022	4511
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> )	<b>11263</b>	<b>6520</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> ), wenn Weiden nicht beregnet werden	<b>2242</b>	<b>2010</b>

**Tab. 4.29b** Wasserbedarf im Etesienklima (Standort Rom)

	Standardkost	fleischreduzierte Kost
Bedarf zum Trinken (m <sup>3</sup> )	20	20
Viehtränke (m <sup>3</sup> )	731	365
Bedarf im Haushalt (m <sup>3</sup> )	731	731
Bedarf zur Beregnung der Felder (m <sup>3</sup> )	1520	1788
Bedarf zur Beregnung der Weiden (m <sup>3</sup> )	18044	9022
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> )	<b>21045</b>	<b>11925</b>
gesamter Wasserbedarf im Dorf (m <sup>3</sup> ), wenn Weiden nicht beregnet werden	<b>3002</b>	<b>2904</b>

## 5 Modellierung

### 5.1 Allgemeine Vorbemerkung

Die Entnahme von Brunnenwasser aus dem Grundwasserstrom übt zwar im Prinzip einen Einfluss auf die Radionuklidkonzentration im Grund- und daher auch im Brunnenwasser aus, aber bei einer Entnahme von sehr geringen Wassermengen ist dieser nicht messbar. In Tabelle 5.1 sind die Wassermengen aufgeführt, die in den verschiedenen Szenarien für ein Dorf mit 20 Bewohnern gebraucht werden. Die tägliche Entnahme liegt danach zwischen 2 m<sup>3</sup> in einem Szenario ohne jegliche Beregnung und 400 m<sup>3</sup> im Szenario mit der größten Wasserverwendung.

Weil die Schnittstelle zwischen Geosphäre und Biosphäre nicht Gegenstand der hier vorliegenden Untersuchung ist, wird sie nicht modelliert, sondern statt dessen die beiden extremen Varianten:

1. Die Entnahme von Grundwasser ist ohne jeden Einfluss auf die Radionuklidkonzentration im Grundwasser. Eingangsgröße für die radioökologischen Berechnungen ist die Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser in der Dimension Bq/l.
2. Die Entnahme von Grundwasser führt dazu, dass nur sauberes Wasser nachläuft, aber kein Wasser aus dem Endlager. Der Freisetzungsterm wird daher in der Einheit Bq/a angegeben.

Bei der Berechnung der im zweiten Fall zu unterstellenden Entnahmemengen wird konservativ angenommen, dass kein Brunnenwasser für die Säuberung von Stallungen eingesetzt wird, denn hierzu kann auch Flusswasser benutzt werden. Außerdem wird unterstellt, dass kein Gewerbebetrieb im Dorf Wasser aus dem Brunnen nutzt.

In Tabelle 5.1 werden die in Abschnitt 4 berechneten notwendigen Wassermengen für die verschiedenen Klimabedingungen zusammengestellt.

**Tab. 5.1** Förderung von Brunnenwasser in m<sup>3</sup>/a

		Ernährungsform	
ET	I	Dorf ohne Treibhäuser	750
Tundrenklima	II	Dorf mit Treibhäusern	1700
Df Feuchtwinterkaltes Klima	I	Dorf im Norden ohne Treibhäuser	2000
	II	Dorf im Norden mit Treibhäusern	2800
	III	Dorf im Süden mit Treibhäusern Dito ohne Beregnung von Weiden	33000 2600
Ds Wintertrockenes kaltes Klima	I	Dorf im Norden ohne Treibhäuser	140000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2400
	II	Dorf im Norden mit Treibhäusern	110000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	3000
III	Dorf im Süden mit Treibhäusern	64000	
	Dito ohne Beregnung von Weiden	3700	
Cf Feuchtgemäßigtes Klima, kühl, ozeanisch „Edinburgh“	Ia	Dorf mit Standardernährung	13000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2100
	Ib	Dorf mit fleischreduzierter Ernährung	9100
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2000
	Ic	Dorf mit Treibhäusern Dito ohne Beregnung von Weiden	14000 2400
Cf Feuchtgemäßigtes Klima, mittlerer Teil „Hannover“	IIa	Dorf mit Standardernährung	15000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2300
	IIb	Dito ohne Beregnung von Weiden	10600
		Dorf mit fleischreduzierter Ernährung	2300
	IIc	Dorf mit Treibhäusern Dito ohne Beregnung von Weiden	16000 2600
Cf Feuchtgemäßigtes Klima, kontinental „Prag“	IIIa	Dorf mit Standardernährung	19000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2500
	IIIb	Dorf mit fleischreduzierter Ernährung	13000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2500
	IIIc	Dorf mit Treibhäusern Dito ohne Beregnung von Weiden	20000 2700
Cf Feuchtgemäßigtes Klima, warm, ozeanisch „Paris“	IVa	Dorf mit Standardernährung	19000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2800
	IVb	Dorf mit fleischreduzierter Ernährung	13000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2800
	IVc	Dorf mit Treibhäusern Dito ohne Beregnung von Weiden	21000 3000
Cs Etesienklima, Relativ feucht „Mailand“	Ia	Dorf mit Standardernährung	11000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	2200
	Ib	Dorf mit fleischreduzierter Ernährung Dito ohne Beregnung von Weiden	6500 2000
Cs Etesienklima, Relativ trocken „Rom“	IIa	Dorf mit Standardernährung	21000
		Dito ohne Beregnung von Weiden	3000
	IIb	Dorf mit fleischreduzierter Ernährung Dito ohne Beregnung von Weiden	12000 2900

Im Folgenden werden die Grundlagen für die Berechnung der Konzentration von Radionukliden in Nahrungsmitteln vorgestellt. Die aus dem Verzehr resultierende Strahlenexposition  $H$  in Sv/a ergibt sich aus dem Produkt aus der Konzentration des Radionuklids  $r$  im jeweiligen Nahrungsmittel  $C_r^{\text{Nahrung}}$ , der Aufnahmerate für dieses Nahrungsmittel  $U^{\text{Nahrung}}$  und dem Ingestionsdosisfaktor des Radionuklids  $r$  für das Gewebe oder Organ  $T$   $g_{g,r,T}$  in Sv/Bq, siehe Formel 5.1.1. Bei den Inhalationspfaden wird das Produkt aus Konzentration des Radionuklids  $r$  in der Luft  $C_r^{\text{Luft}}$ , der Atemrate  $U^{\text{Luft}}$  und dem Inhalationsdosisfaktor des Radionuklids  $r$  für das Gewebe oder Organ  $T$   $g_{h,r,T}$  in Sv/Bq gebildet, siehe Formel 5.1.2. Die äußere Bestrahlung berechnet sich aus dem Produkt aus der Belegung des Bodens oder Sedimentes in den obersten 5 cm mit dem Radionuklid  $r$   $O_r^{\text{Substrat}}$ , der Aufenthaltsdauer auf diesem Substrat  $Z^{\text{Substrat}}$  in s/a, dem Faktor zur Berücksichtigung der Geometrie der Flächenquelle  $f_u^{\text{Substrat}}$  und dem Dosisleistungsfaktor  $g_{b,r,T}$  für die äußere Bestrahlung des Radionuklids  $r$  für das Gewebe oder Organ  $T$  in Sv/s : Bq/m<sup>2</sup>, siehe Formel 5.1.3. Hier gibt  $f_r$  den Anteil des Gamma-Emissionsspektrums des Radionuklids  $r$  oberhalb der Energie 0.2 MeV an;  $c_{\text{Geo},b1}$  und  $c_{\text{Geo},b2}$  sind die Korrekturfaktoren zu Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzpersonen für die Energiegruppe 1 und 2. Für den Erwachsenen gilt:  $c_{\text{Geo},b1} = c_{\text{Geo},b2} = 1$ .

$$H_{T,g,r}^{\text{Nahrung}} = \sum_{\text{Nahrung}=1}^{\text{Nahrung}=n} (U^{\text{Nahrung}} \cdot C_r^{\text{Nahrung}}) \cdot g_{g,r,T} \quad (5.1.1)$$

$$H_{T,h,r}^{\text{Luft}} = \sum_{\text{Luft}=1}^{\text{Luft}=n} (U^{\text{Luft}} \cdot C_r^{\text{Luft}}) \cdot g_{h,r,T} \quad (5.1.2)$$

$$H_{T,b,r}^{\text{Substrat}} = \sum_{\text{Substrat}=1}^{\text{Substrat}=n} (Z^{\text{Substrat}} \cdot O_r^{\text{Substrat}} \cdot f_u^{\text{Substrat}}) \cdot g_{b,r,T} \cdot (f_r \cdot c_{\text{Geo},b1} + (1-f_r) \cdot c_{\text{Geo},b2}) \quad (5.1.3)$$

Alle in Abschnitt 5 benutzten Parameterwerte werden in Abschnitt 6 zusammenfassend beschrieben, soweit sie nicht in Abschnitt 4 abgeleitet wurden. Außerdem werden alle Parameterwerte in Abschnitt 6 zusammengefasst.

## 5.2 Pfad: Trinkwasser

Folgende Wasserquellen stehen im Prinzip zur Verfügung: Regenwasser kann direkt aus einer Zisterne gewonnen werden oder nach Versickerung im Boden über einen oberflächennahen Brunnen oder aus einem Fließgewässer. Dies ist die einfachste Art der Gewinnung, die in der Praxis sicherlich so lange genutzt werden wird, wie Oberflächenwasser in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung steht. Oberflächenwasser wird primär nicht durch ein Endlager kontaminiert. Erst im Falle eines örtlichen Wassermangels werden Brunnen gebaut. Bei sehr kalten Klimabedingungen frieren diese Brunnen jedoch im Winter zu, insbesondere wenn der Brunnen in eine Permafrostschicht hinein reicht. Die Permafrostschicht bewirkt im übrigen, dass das Niederschlagswasser nicht versickert, sondern sich in wasserreichen Flüssen sammelt, so dass auch deshalb Wassermangel unwahrscheinlich ist.

Gleichwohl wird angenommen, dass in allen Szenarien Brunnen gebaut werden; nur die Fördermenge ist unterschiedlich. Ob und wie sich die Fördermenge auf die Radionuklidkonzentration auswirkt, hängt von den gegebenen Randbedingungen für den Eintritt der Radionuklide in die Biosphäre ab. Dies Problem wird hier nicht behandelt.

Am Beispiel „Trinkwasserverzehr“ soll der Aufbau der Tabellen über die FEPs (Features, Events und Processes) erläutert werden. Tabelle 5.2a zeigt einige mögliche Interaktionen. In der Diagonalen stehen die Kompartimente und Charakteristika, horizontal sind die möglichen Beeinflussungen zu erkennen. Ob das Wasser im Aquifer gefördert und verwendet wird, hängt z. B. von seinem Wohlgeschmack ab. Wenn es gefördert wird, entsteht ein Entnahmetrichter im Aquifer, und Wasser aus dem Endlager und von anderswo läuft nach, wodurch es zu einer Verdünnung kommen kann. Wenn das aus dem Brunnen geförderte Wasser zur Klärung einige Zeit aufbewahrt wird, können Radionuklide zerfallen; der Bodensatz kann auf den Komposthaufen geworfen werden und so schließlich in den Boden gelangen. Dieser Pfad ist nicht eingezeichnet. Der Gehalt an Spurenelementen im Trinkwasser kann die Dosisfaktoren für die entsprechenden radioaktiven Isotope beeinflussen, wenn es sich um geregelte Elemente handelt. Die Trinkmenge selbst hat zusätzlich einen Einfluss auf die Höhe einiger Dosisfaktoren auf Grund der Spülung der Nieren. Rückkoppelungen treten in diesem Beispiel nicht auf.



**Tab. 5.2a:** FEP-Liste für Trinkwasserverzehr

Wasser im Aquifer	Förderung im Brunnen	-	-	-
-	Wasser im Brunnen	Aufbewahrung, Aufbereitung	-	-
-	-	Trinkfertiges Wasser	Entnahme	Zufuhr von Spurenelementen
-	-	-	getrunkenes Wasser	Zufuhr von Spurenelementen
-	-	-	-	Dosis

Tabelle 5.2a zeigt auch einige FEPs, die in Gleichung 5.2.1 nicht aufgenommen werden. Einerseits wird das Bindeglied zwischen Geosphäre und Biosphäre außer Acht gelassen, andererseits wird konservativ angenommen, dass das Wasser direkt vom Brunnen getrunken wird, ferner, dass weder eine Verringerung der Konzentration durch Ausflockung radioaktiver Stoffe noch eine Erhöhung der Konzentration durch Verdampfen von Wasser beim Kochen eintritt. Eine etwaige Zeitverzögerung zwischen der Entnahme des Wassers aus dem Brunnen und dem Verzehr wird vernachlässigt, zumal die in Frage kommenden Radionuklide langlebig sind. Dosisfaktoren werden als statisch behandelt.

In der bereinigten FEP-Liste in Tabelle 5.2b bleibt somit nur das Wasser bestehen ohne jegliche Beeinflussung. In den weiteren Tabellen über die FEPs wird der Aquifer als Teil der Geosphäre behandelt und der Dosisfaktor als konstant angenommen, so dass die FEP-Liste nur von der Konzentration im Brunnenwasser bis zur Konzentration im verzehrfertigen Nahrungsmittel reicht.

**Tab. 5.2b:** Vereinfachte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Trinkwasser

Wasser im Brunnen = trinkfertiges Wasser
---

Die Konzentration der Radionuklide im Trinkwasser  $C_r^{\text{Trinkwasser}}$  ist daher mit der Konzentration im Brunnenwasser  $C_r^{\text{BW}}$  identisch, siehe Formel 5.2.1.

$$C_r^{\text{Trinkwasser}} = C_r^{\text{BW}} \quad (5.2.1)$$

### 5.3 Pfad: Fischverzehr

Der Modellierung liegen folgende Annahmen zu Grunde: Fische werden in Fließgewässern gezogen. Fließgewässer werden entweder direkt durch einen Quellzufluss oder durch eingeleitetes Abwasser radioaktiv kontaminiert. Hierfür steht nicht das gesamte über einen Brunnen geförderte Wasser zur Verfügung, sondern nur das im Haushalt zum Spülen, Putzen und Baden verwendete Wasser. In der hier behandelten Variante „Eintritt von Radionukliden über einen Brunnen in die Ökosphäre“ ist die Radionuklidkonzentration im Fluss dementsprechend wesentlich geringer als im Brunnen. Deshalb ist der Pfad „Fischverzehr“ nur dann bedeutend, wenn die Strahlenexposition über andere Expositionspfade sehr gering ist.

Tabelle 5.3a zeigt die ursprüngliche FEP-Liste. Daraus wird unter der Annahme, dass bei einigen Übergängen zwischen zwei Kompartimenten keine Veränderung der Radionuklidkonzentration eintritt, die bereinigte FEP-Liste in Tabelle 5.3b.

**Tab 5.3a:** FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Fischen

Wasser im Brunnen	Aufbewahrung, Aufbereitung, Verschmutzung durch Gebrauch		-	-	-
-	Wasser im Ausguss	Verzögerung, Klärung	-	-	-
-	-	Wasser im Zulauf zum Fließgewässer	Verdünnung, Sedimentation und Aufwirbelung; chemische Veränderung durch Pflanzen und Plankton	-	-

-	-	-	Wasser im Fließgewässer	Nahrungsaufnahme, Atmung, externe Kontamination	-
-	-	-	Ausscheidung	lebendige Fische im Fließgewässer	Aufbewahrung, Entschuppung, Zubereitung, Garung
-	bei der Zubereitung anfallendes Abwasser	Fischabfall, Stoffwechsel-Endprodukte nach Klärung	-	-	verzehrbereite Fische

Die FEP-Liste in Tabelle 5.3a wird verkürzt unter der konservativen Annahme, dass sich die Radionuklidkonzentration bei einigen Schritten nicht verändert. Die Verringerung der Radionuklidkonzentration im Fluss durch Entnahme von Fischen wird vernachlässigt; dementsprechend bleibt auch die Einleitung von Abwasser, das z.B. bei der Zubereitung der Fische anfällt, unberücksichtigt. So ergibt sich Tabelle 5.3b.

**Tab. 5.3b:** Vereinfachte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Fischen

Wasser im Brunnen = im Zulauf zum Fließgewässer	Verdünnung, Sedimentation, Aufwirbelung; chemische Veränderung durch Pflanzen und Plankton	-
-	Wasser im Fließgewässer	Nahrungsaufnahme, externe Kontamination
	Ausscheidung	lebendige Fische = verzehrbereite Fische

Die Konzentration des Radionuklids  $r$  im Fließgewässer wird durch seine Konzentration im Brunnenwasser und durch das Verhältnis der Menge des in den Fluss eingeleiteten Brunnenwassers  $Q^{\text{Haushalt}}$  zum mittleren Abfluss  $MQ$  beschrieben, siehe Formel 5.3.1.

$$C_r^{\text{Fließ}} = C_r^{\text{BW}} \cdot \frac{Q^{\text{Haushalt}}}{MQ} \quad (5.3.1)$$

Bei der Feststellung der möglichen Größe des Fließgewässers (in Abschnitt 6) stellt sich heraus, dass es unmöglich ist, den gesamten Bedarf an Fisch aus diesem Fließgewässer zu gewinnen. Daher wird die Berechnungsformel für die Konzentration von

Radionukliden in Fisch  $C_r^{\text{Fisch}}$  aus /BMU 01/ ergänzt durch den Anteil des Fisches am gesamten Fischverzehr, der aus dem Vorfluter stammt, siehe Formel 5.3.2.

$$C_r^{\text{Fisch}} = C_r^{\text{Fließ}} \cdot T_r^{\text{Fi}} \cdot \frac{U_{\text{Fließ}}^{\text{Fisch}}}{U_{\text{Gesamt}}^{\text{Fisch}}} \quad (5.3.2)$$

$T_r^{\text{Fi}}$  gibt hier den Konzentrationsfaktor für das Radionuklid  $r$  in Fischfleisch unter Gleichgewichtsbedingungen an,  $U_{\text{Gesamt}}^{\text{Fisch}}$  ist der gesamte verzehrte Fisch,  $U_{\text{Fließ}}^{\text{Fisch}}$  der aus dem Fließgewässer stammende Fisch.

Es schließen sich Verbindungen zu anderen Expositionspfaden an. Vom Wasser im Fließgewässer gehen aus:

1. die externen Expositionspfade „Aufenthalt am Flussufer“ und „Aufenthalt in Überschwemmungsgebieten“
2. die internen Pfade „Verzehr von Pflanzen aus Überschwemmungsgebieten“ und „Verzehr von tierischen Nahrungsmitteln, wenn die Tiere im Überschwemmungsgebiet geweidet haben“.

Außerdem werden Radionuklide, die im Fischabfall und in den festen Stoffwechsellendprodukten gebundenen sind, über die Kläranlage und den Kompost dem Boden zugeführt.

#### **5.4 Pfad: im Überschwemmungsgebiet wild wachsende Beeren und Pilze**

In diesem Szenario wird radionuklidhaltiges Wasser über einen Brunnen gefördert und nach Gebrauch im Haushalt als Abwasser in einen Vorfluter eingeleitet. Während der Schneeschmelze tritt dieser Vorfluter regelmäßig über die Ufer, wodurch die ufernahen Areale überschwemmt werden. Wenn das Wasser zurückgegangen ist, wachsen hier u. a. Beeren und Pilze. Bei Hochwasser (HQ) ist die Wasserführung im Fließgewässer höher als bei Mittelwasser (MQ).

Quantitativ kann dieser Pfad nur dann bedeutend sein, wenn die Strahlenexposition über andere Expositionspfade sehr gering ist. Der erste Anschein spricht dafür, dass dies nur der Fall sein kann in einem Szenario, in dem keine Beregnung erfolgt, also in den Szenarien „Tundra“ und „feuchtwinterkaltes Klima“, und nur im Fall, dass keine Treibhäuser vorhanden sind. Überschwemmungen sind besonders dann wahrscheinlich, wenn Permafrostboden das Eindringen des Schmelzwassers in den Boden verhindert. Die Inkonsistenz, dass die Förderung von Brunnenwasser in einem Szenario mit Permafrostboden behindert sein kann, wird hingenommen.

Da Überschwemmungen hauptsächlich während der Schneeschmelze auftreten, haben die Beerensträucher zu diesem Zeitpunkt noch keine Früchte angesetzt und auch die Fruchtkörper der Pilze bilden sich erst später. Mit einer direkten externen Kontamination ist daher nicht zu rechnen. Jedoch haben manche Beerensträucher immergrüne Blätter, über die eine indirekte Kontamination der Früchte nach Translokation erfolgen könnte, aber von der Überschwemmung bis zur Reifezeit der Beeren dauert es noch Monate. Mit der Aufnahme von Radionukliden über die Wurzeln in die Beerenfrüchte ist dagegen zu rechnen. In der unten stehenden Formel 5.4.1 wird die Aufnahme über die Wurzeln berücksichtigt, nicht jedoch die Translokation. Pilze nehmen Radionuklide über das Myzel aus dem Boden auf, eine Translokation scheidet aus.

In Tabelle 5.4a wird die FEP-Liste für Beeren und Pilze aus Überschwemmungsgebieten gezeigt. Sie gilt prinzipiell für beide Nahrungsmittel, doch nimmt das Myzel der Pilze Radionuklide bevorzugt aus anderen Bodenschichten auf als die Wurzeln der Pflanzen, die ihrerseits wieder als Substrat für Pilzmyzel dienen können. Dabei bestehen sowohl bei Pflanzen als auch bei Pilzen interspezifische Unterschiede.

**Tab. 5.4a:** FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Beeren und Pilze

Wasser im Fließgewässer	Verdünnung durch Schmelz- und Regenwasser	-	-	-	-
-	Wasser im Fließgewässer bei Hochwasser	Sedimentation	-	-	-
Auswaschung durch Regen	Aufwirbelung	obere Schichten des Bodens in Ufernähe	Bioturbation, Auswaschung durch Regen	Wurzel- bzw. Hyphenaufnahme	-

Auswaschung durch Regen	-	Bioturbation Grundwasseraufstieg bei Trockenheit	untere Schichten des Uferbodens	Wurzel- bzw. Hyphenaufnahme	-
	-	absterbende Wurzeln, Blattfall, Tierfraß (Exkrememente, Tod des Tieres)	absterbende Wurzeln, Tierfraß (Exkrememente, Tod des Tieres)	frisch geerntete Beeren und Pilze	Aufbewahrung, Zubereitung
bei der Zubereitung anfallendes Abwasser, flüssige Stoffwechselendprodukte nach Klärung	-	-	-	-	verzehrfertige Beeren und Pilze

Die verkürzte FEP-Liste geht aus Tabelle 5.4b hervor. Hier wird z. B. konservativ vernachlässigt, dass die Ernte von Pflanzen und Pilzen aus dem Überschwemmungsgebiet eine Verringerung der Radioaktivitätskonzentration im Boden zur Folge hat; dementsprechend wird auch nicht berücksichtigt, dass die entnommenen Radionuklide über Exkrememente und Klärung wieder an den Fluss zurückgegeben werden können.

**Tab. 5.4b:** Vereinfachte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Beeren und Pilzen

Wasser im Fließgewässer	Verdünnung durch Schmelz- und Regenwasser	-	-	-
-	Wasser im Fließgewässer bei Hochwasser	Sedimentation	-	-
-	Aufwirbelung	Boden in Ufernähe	Wurzel- bzw. Hyphenaufnahme	-
	-	absterbende Wurzeln, Blattfall, Tierfraß (Exkrememente, Tod des Tieres)	frisch geerntete Beeren und Pilze	Aufbewahrung
-	-	-	-	verzehrfertige Beeren und Pilze

Die Berechnungsmethode für die Höhe der Radionuklidkonzentration im Boden des Überschwemmungsgebietes im feuchtemäßigtem Klima geht aus /BMU 01/ hervor. Es ist kein Grund zu sehen, der dagegen spräche, diese Methode auch in der Tundra und im feuchtwinterkalten Klima anzuwenden. Die Gleichgewichtskonzentration im Boden wird binnen weniger Jahre erreicht. Der Übergang aus dem Wasser in den Boden des Überschwemmungsgebietes wird mit Hilfe der Übergangskonstanten  $K_{\text{t}}$

(in l/(m<sup>2</sup> s)) beschrieben. Formel 5.4.1 gibt die Radionuklidkonzentration im Boden des Überschwemmungsgebietes  $C_r^{\text{ÜBoden}}$  an; dabei wird angenommen, dass die Radionuklide in einer gut durchwurzelten Bodenschicht mit der Flächentrockenmasse  $p^m$  homogen verteilt sind; hieraus wird mit Hilfe des Transferfaktors für den Übergang aus dem Boden über die Wurzeln in die Pflanze  $T_r^{\text{Pflanze}}$  und dem radioaktiven Zerfall in der Zeit zwischen Ernte und Verzehr  $t_v^{\text{Klima,Pflanze}}$  die Konzentration des Radionuklids  $r$  in der verzehrbereiten Pflanze  $C_r^{\text{Pflanze}}$  berechnet, siehe Formel 5.4.2.

$$C_r^{\text{ÜBoden}} = C_r^{\text{Fließ}} \cdot \frac{MQ}{HQ} \cdot K_r^e \cdot \ln 2 \cdot \frac{1}{p^m \cdot \lambda_{\text{eff},r}^{\text{Ü}}} \quad (5.4.1)$$

$$C_r^{\text{Pflanze}} = C_r^{\text{ÜBoden}} \cdot T_r^{\text{Pflanze}} \cdot e^{(-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Klima,Pflanze}})} \quad (5.4.2)$$

Die effektive Abbaukonstante  $\lambda_{\text{eff},r}^{\text{Ü}}$  für das Radionuklid  $r$  im Boden des Überschwemmungsgebietes berechnet sich aus der Abbaukonstanten zur Berücksichtigung des Eindringens der Radionuklide in den Boden des Überschwemmungsgebietes  $\lambda_{\text{Ü}}$  und der physikalischen Zerfallskonstanten  $\lambda_r$  des Radionuklids  $r$ :

$$\lambda_{\text{eff},r}^{\text{Ü}} = \lambda_{\text{Ü}} + \lambda_r.$$

## 5.5 Pfad: Pflanzenzucht im Überschwemmungsgebiet

Da die Radionuklidkonzentration in Flusswasser geringer ist als in Brunnenwasser und der Fluss überdies nur bei Hochwasser über die Ufer tritt, braucht dieser Expositionspfad nur dann geprüft zu werden, wenn landwirtschaftliche Nutzpflanzen nicht oder kaum beregnet werden. In Abschnitt 4 wurde dargelegt, dass diese Bedingung nur im feuchtwinterkalten und im ozeanischen feuchtgemäßigten Klima erfüllt ist.

Für die Berechnung der Radionuklidkonzentrationen in landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, die im Überschwemmungsgebiet wachsen, gelten die gleichen FEP-Listen (Tabelle 5.4a und 5.4b) wie für wild wachsende Pflanzen. Die Berechnungsverfahren sind in /BMU 01/ beschrieben. Dabei ist nur die Aufnahme von Radionukliden über die Wurzel in die Pflanzen zu beachten. Die Translokation braucht nicht beachtet zu wer-

den, da die Blätter der verschiedenen Nutzpflanzen erst einige Zeit nach der Schneeschmelze erscheinen. Formel 5.4.2 gilt daher.

## 5.6 Pfad: Viehzucht im Überschwemmungsgebiet

Auch dieser Expositionspfad ist nur zu beachten, wenn Weiden nicht oder kaum be-  
regnet werden, also im feuchtwinterkalten Klima und im ozeanischen feuchtgemäßigen  
Klima. Unter den Bedingungen der Tundra werden Rentiere gehalten, die zeitwei-  
se im Überschwemmungsgebiet weiden.

Die FEP-Listen gliedern sich in drei Teile, nämlich in die Kontamination der Futter-  
pflanzen, die Nahrungsaufnahme der Tiere mit dem Übergang der Radionuklide vom  
Futter in Milch und Fleisch und schließlich den Verlust durch Vorratshaltung und Zu-  
bereitung der Speisen. Dabei entspricht der erste Teil weitgehend den FEP-Listen für  
Pflanzenzucht im Überschwemmungsgebiet, siehe Tabellen 5.4a und 5.4b.

**Tab. 5.5a:** FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Milch und Fleisch von Tieren,  
die im Überschwemmungsgebiet geweidet haben

Wasser im Fließgewässer	Verdünnung durch Schmelz- und Regenwasser	-						
-	Wasser im Fließgewässer, wenn es über die Ufer tritt	Sedimentation	-	Oberflächliche Kontamination	-	-	-	-
Auswaschung durch Regen und Schmelzwasser	Aufwirbelung	obere Schichten des Bodens in Ufernähe	Bioturbation, Auswaschung durch Regen und bei der Schneeschmelze	Wurzelaufnahme	-	Bodenaufnahme beim Weidegang	-	-
Auswaschung durch Regen, und Schmelzwasser	Auswaschung durch Regen und Schmelzwasser	Bioturbation; Grundwasseraufstieg bei Trockenheit	untere Schichten des Uferbodens	Wurzelaufnahme	-	-	-	-
Abwaschung bei Regen	-	absterbende Wurzeln, Blattfall, Tierfraß (Exkrememente, Tod des Tieres)	absterbende Wurzeln, Tierfraß (Exkrememente, Tod des Tieres)	Frischer Weidebewuchs	Aufbewahrung, Silage, Trocknung	-	-	-



-	-	-	-	-	verfütterbarer Weidebewuchs	Beschaffenheit und Menge des Futters beeinflussen die Aufnahme von Radionukliden ins Blut	Beschaffenheit und Menge des Futters beeinflussen den Übergang von Radionukliden	-
bei der Stallreinigung anfallendes Abwasser nach Klärung	-	tierische Exkremente	-	-	-	Tierkörper	Stoffwechsel und Größe des Tieres	-
-	-	-	-	-	-	-	frische Milch, frisches Fleisch	Aufbewahrung, Zubereitung
bei der Zubereitung anfallendes Abwasser; Stoffwechselendprodukte	-	-	-	-	-	-	-	verzehrbereite tierische Nahrung

Durch Beschränkung auf die quantitativ wichtigsten Vorgänge ergibt sich die verkürzte FEP-Liste, siehe Tabelle 5.5b. Wie schon bei anderen Pfaden wird die Rückgabe von Radionukliden an den Boden nicht berücksichtigt, da auch der Verlust von Radionukliden aus dem Boden durch die Ernte des Futters bzw. die direkte Futteraufnahme des Tieres vernachlässigt wird.

**Tab. 5.5b:** Verkürzte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Milch und Fleisch von Tieren, die im Überschwemmungsgebiet geweidet haben

Wasser im Fließgewässer	Verdünnung durch Schmelz- und Regenwasser	-	-	-	-	-	-
-	Wasser im Fließgewässer, wenn es über die Ufer tritt	Sedimentation	oberflächliche Kontamination	-	-	-	-
-	-	obere Schichten des Bodens in Ufernähe	Wurzel-Aufnahme	-	Bodenaufnahme	-	-
-	-	-	frischer Weidebewuchs	Aufbewahrung	-	-	-

	-	-	-	Verfütterbarer Weidebewuchs	Aufnahme	-	-
-	-	-	-	-	Tierkörper	Stoffwechsel und Größe des Tieres	-
-	-	-	-	-	-	frische Milch, frisches Fleisch	Aufbewahrung, Zubereitung
	-	-	-	-	-	-	verzehrbereite tierische Nahrung

Die Berechnungsgrundlagen für die Radionuklidkonzentration in Rindfleisch und Kuhmilch sind in /BMU 01/ festgelegt. Es sind sowohl die oberflächliche Kontamination als auch der Transfer aus dem Boden zu beachten. Außerdem nehmen weidende Tiere unwillkürlich auch Erde auf. Dieser Pfad wird in /BMU 01/ nicht berücksichtigt, gehört jedoch zum Standard, so auch in /SSK 92/. Formel 5.6.1 beschreibt die Radionuklidkonzentration  $C_r^{\text{Tier}}$  in Kuhmilch und Rindfleisch unter Berücksichtigung der Zeit zwischen der Ernte und Verfütterung des Viehfutters und der Zeit zwischen Schlachtung und Verzehr.

$$C_r^{\text{Tier}} = \{[(C_r^{\text{Weide}} \cdot f_p) + (C_r^{\text{Weide}} \cdot e^{-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Lf}}}) \cdot (1 - f_p)] \cdot M_{\text{Fu}}^{\text{Tier}} + C_r^{\text{Üboden}} \cdot M_{\text{Üboden}}^{\text{Tier}}\} \cdot T_r^{\text{Tier}} \cdot e^{-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Nahrung}}} \quad (5.6.1)$$

Hier symbolisiert  $C_r^{\text{Tier}}$  die Konzentration des Radionuklids  $r$  im tierischen Produkt (Milch bzw. Fleisch), und  $C_r^{\text{Weide}}$  die Konzentration im frischen Weidebewuchs.  $f_p$  ist der Anteil des Jahres, in dem frischer Weidebewuchs zur Verfügung steht, die Zeit zwischen dem Schnitt und dem Verzehr des Lagerfutters wird durch  $t_v^{\text{Lf}}$  angegeben.  $M_{\text{Fu}}^{\text{Tier}}$  ist die Futtermenge (kg/Tag) der Tiere „Milchkuh“ und „Fleischrind“,  $M_{\text{Üboden}}^{\text{Tier}}$  die tägliche Aufnahme von Erde aus dem Überschwemmungsgebiet und  $T_r^{\text{Tier}}$  der Transferfaktor für den Übergang aus der täglichen Nahrung in Milch und Fleisch.

In der Tundra weiden Rentiere. Sie nehmen Gräser, Beeren und Pilze auf, die im Überschwemmungsgebiet besonders gut wachsen, doch die Rentierflechte wächst nur auf trockenen Standorten /MÜL 81/. Die Hauptnahrungsquelle der Rentiere kann daher nur durch trockene Ablagerung resuspendierter Sedimentteilchen kontaminiert werden; dabei tritt im Zuge der Verfrachtung mit dem Wind zusätzlich eine Verdünnung ein; im übrigen werden die zeitweise überschwemmten Tundra-Areale, die keinen Pflanzenbewuchs aufweisen, auf Grund der niedrigen Temperaturen häufig so feucht sein, dass eine bedeutende Erosion mit dem Wind nicht erwartet werden kann. Daraus folgt: die Radionuklidkonzentration in der Rentierflechte braucht nicht berechnet zu werden. Die Situation in einer Tundra am Endlager unterscheidet sich insofern stark von der Situation in einer Tundra nach dem Unfall in Tschernobyl, wo ein bedeutender Teil der Kontamination des Rentierfleisches auf Flechten beruht.

Frei lebende Rentiere nehmen kein Lagerfutter auf. Die Radionuklidkonzentration in Milch und Fleisch wird somit nach Formel 5.6.2 berechnet.

$$C_r^{\text{Tier}} = (C_r^{\text{Weide}} \cdot M_{\text{Weide}}^{\text{Tier}} + C_r^{\text{Beere}} \cdot M_{\text{Beeren}}^{\text{Tier}} + C_r^{\text{Pilze}} \cdot M_{\text{Pilze}}^{\text{Tier}} + C_r^{\text{Üboden}} \cdot M_{\text{Üboden}}^{\text{Tier}}) \cdot T_r^{\text{Tier}} \cdot e^{-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Nahrung}}} \quad (5.6.2)$$

In dieser Formel erscheinen die Konzentrationen des Radionuklids  $r$  im tierischen Produkt (Milch oder Fleisch des Rentiers)  $C_r^{\text{Tier}}$ , in Beeren  $C_r^{\text{Beere}}$  und Pilzen  $C_r^{\text{Pilze}}$  sowie die Futteraufnahme (kg/Tag) des Rentieres an Weidebewuchs  $M_{\text{Weide}}^{\text{Tier}}$ , Beeren  $M_{\text{Beere}}^{\text{Tier}}$  und Pilzen  $M_{\text{Pilze}}^{\text{Tier}}$ .

## 5.7 Pfad: Berechnungsfeldbau

### 5.7.1 FEP-Listen

Radionuklide gelangen mit dem Beregnungswasser auf die Pflanzenoberfläche und in den Boden. Folgende Transportwege schließen sich an:

- Die aufgebrachten Radionuklide haften auf den Blättern, werden durch das Wachstum der Pflanze verteilt und verdünnt, mit weiterem Regen abgewaschen, vor dem Blattfall resorbiert oder mit dem Blattfall abgeworfen.

- Sie geraten auf den Boden und werden in der Hauptwurzelzone verteilt. Über die Wurzeln werden sie aus dem Boden aufgenommen und in die zum Verzehr bestimmten Pflanzenorgane transportiert. Ein weiterer Teil wird mit dem Regen- oder dem Beregnungswasser in tiefere Bodenschichten ausgewaschen oder mit oberflächlich abfließendem Wasser abtransportiert.

Dieses Modell, das z. B. in /BMU 01/ verwendet wird, basiert auf dem Kenntnisstand der Siebzigerjahre. Für die Abschätzung der maximal verursachten potentiellen Strahlenexposition in einem Zeitraum von 50 Jahren ist das Modell ausreichend. Es ist auch konservativ, denn es geht davon aus, dass die Blätter aller Pflanzen direkt verzehrt werden. Die Radionuklidkonzentration in den anderen zum Verzehr bestimmten Pflanzenteilen ist nämlich normalerweise geringer als in den Blättern.

In Abbildung 5.1 werden die beiden genannten Wege, auf denen Radionuklide in die Pflanzen und den Boden eintreten und ihn bzw. sie wieder verlassen, veranschaulicht.

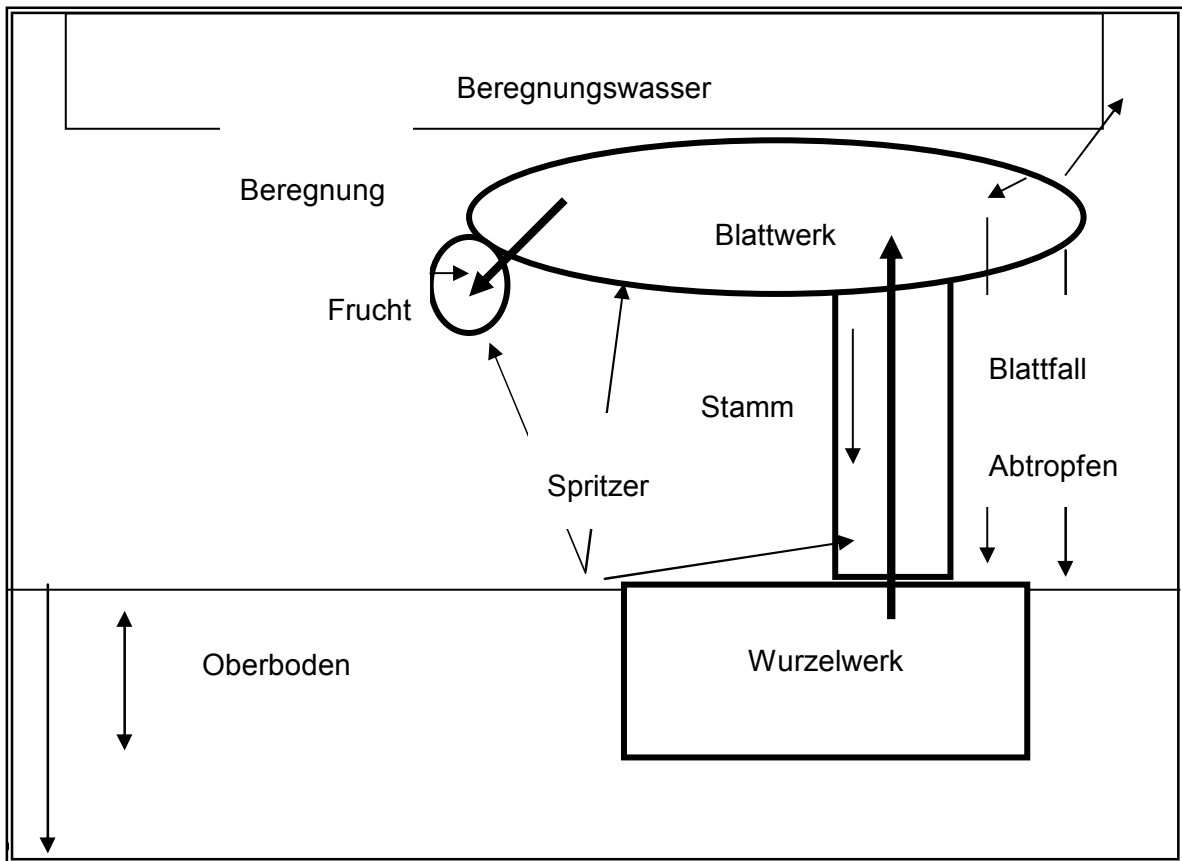
Die FEP-Liste für die Berechnung der Radionuklidkonzentration in Pflanzen auf beregneten Flächen geht aus Tabelle 5.6a hervor.

In dieser FEP-Liste werden gegenüber /BMU 01/ weitere Pfade berücksichtigt:

- Auf den Blättern befindliche Radionuklide überwinden die Außenhaut, werden in das Innere der Pflanzen aufgenommen und dann mit dem Saftstrom in andere Pflanzenteile, insbesondere die zum Verzehr bestimmten, transportiert (Translokation). Dieser Vorgang wird in der AVV /BMU 01/ nicht behandelt, statt dessen werden alle Pflanzen als Blattpflanzen aufgefasst. Das Verfahren nach /BMU 01/ ist insbesondere für unterirdisch wachsende Nutzpflanzen, aber auch für Früchte, konservativ.
- Bei der Beregnung und beim Fall großer Wassertropfen von den Blättern spritzen Bodenteilchen hoch, so dass die Radionuklide auf Stamm, Blattwerk und Frucht geraten. Dieser Pfad wird pauschal berücksichtigt als „Ingestion von Erde“, siehe Abschnitt 5.11.

**Abb. 5.1** Einige Transportwege für Radionuklide bei Beregnung





Regen, im Falle einiger Radionuklide auch Verdunstung zu einer Verringerung der Konzentration in den beregneten Gebieten führen. Die sekundäre Kontamination selbst kann vernachlässigt werden, da sie geringer als die primäre sein wird. Der Verlust von Radionukliden durch Erosion usw. ist unter Langzeitbedingungen jedoch zu berücksichtigen.

**Tab. 5.6a:** FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Beregnungswasser in Feldfrüchte

Wasser im Brunnen	Beregnung	Beregnung	Beregnung	-	-	Wasch- und Kochwasser
-	Blätter	Translokation	Abwaschung, Verdunstung, Ernteverlust, Blattfall, Tierfraß	Verlagerung durch Tiere	Translokation, Abwaschung, Ablauf	Aufbewahrung
-	Translokation	Übrige zum Verzehr bestimmte Pflanzenteile	Abwaschung, Ernteverlust, Tierfraß	Verlagerung durch Tiere	-	Aufbewahrung
-	Spritzkontamination, Resuspension und	Spritzkontamination, Resuspension und	obere Bodenschichten	Auswaschung, Bioturbation, Bodenbear-	Aufnahme in die Wurzeln	Reste nach Abwaschen

	Deposition	Deposition		beitung		
Transport mit dem Bodenwasser	-	-	Transport mit dem Bodenwasser bei Wassermangel, Bioturbation	untere Bodenschichten	Aufnahme in die Wurzeln	Reste nach Abwaschen
-	Transfer	Transfer	Absterbende Wurzeln, Tierfraß, Pilzfäden, Exsudate	Absterbende Wurzeln, Tierfraß, Pilzfäden, Exsudate	Wurzeln	Reste nach Abschneiden
-	Düngung mit Abwasser	Düngung mit Abwasser	Rückführung über Kompost und Klärschlamm	-	-	Zubereitete pflanzliche Nahrung

- Frei lebende Tiere (z. B. Vögel, Insekten) nehmen Radionuklide mit der Nahrung auf und exportieren sie in nicht berechnete Gebiete. Die so entstehenden sekundären Kontaminationen werden normalerweise noch geringer als die vorstehend genannten sein und werden daher ebenfalls vernachlässigt. Wegen Geringfügigkeit wird auch die Abnahme der Radionuklidkonzentration in den berechneten Gebieten nicht berücksichtigt.
- Bei der Ernte von Pflanzen und beim Weidegang der Tiere werden Radionuklide aus dem System Boden-Pflanze entfernt. Dieser Pfad wird nicht explizit betrachtet, weil angenommen wird, dass die Radionuklide mit der organischen Düngung (Fäkalien, Kompost) dem Boden wieder zugeführt werden.
- Aus den Wurzeln werden Radionuklide an den Boden abgegeben, z. B. bei Tierfraß und Absterben von Wurzeln. Dieser Pfad wird durch die Annahme der vollständigen Rezyklierung von entnommenen Radionukliden implizit berücksichtigt.

Tabelle 5.6b zeigt die verkürzte FEP-Liste.

**Tab. 5.6b:** Verkürzte FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Berechnungswasser in Feldfrüchte

Wasser im Brunnen	Beregnung	Beregnung	Beregnung	-	-	-
-	Blätter	Translokation	-	-	-	Aufbewahrung
-	-	Übrige zum Verzehr bestimmte	-	-	-	Aufbewahrung

		Pflanzenteile				
-	Spritzkontamination, Re-suspension und Deposition	Spritzkontamination, Resuspension und Deposition	Obere Bodenschichten	Auswaschung, Bioturbation, Bodenbearbeitung	Aufnahme in die Wurzeln	-
-	-	-	Transport mit dem Bodenwasser bei Wassermangel, Bioturbation	untere Bodenschichten	-	-
-	Transfer	Transfer	-	-	Wurzeln	-
-	-	-	-	-	-	zubereitete pflanzliche Nahrung

Der Berechnungspfad gliedert sich somit biologisch gesehen in vier Teile:

- direkte Kontamination der Blätter
- Translokation in die übrigen zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile
- Anreicherung im Boden
- Aufnahme aus dem Boden über die Wurzel

### 5.7.2 Äußere Kontamination der oberirdischen Pflanzenteile

Die oberirdischen Pflanzenteile bestehen im Normalfall aus dem Stängel, den Blättern und den Früchten. Zum Verzehr geeignet sein können Blätter (Blattgemüse, Weidebewuchs), Blattstiele (z. B. Rhabarber), Blütenknospen und Blüten (z. B. Rosenkohl, Blumenkohl, Artischocken) und Früchte. Die Ausprägung der Früchte kann dabei ganz verschieden sein, z. B. saftig und fleischig wie bei Tomaten, Kernobst, Beerenobst, Steinobst und Oliven oder fest und trocken wie bei Getreidekörnern, Leguminosen und Nüssen. Stängel dienen als Viehfutter, können aber auch wirtschaftlich bedeutend sein wie z. B. Baumstämme.

Die Konzentration des Radionuklids  $r$  in Pflanzen, soweit sie auf dem direkten Kontakt mit Beregnungswasser beruht, wird nach /BMU 01/ für den Zeitpunkt des Verzehrs gemäß der Formel 5.7.1 berechnet: Diese Formel ist insbesondere geeignet für Pflanzen, deren Blätter verzehrt werden und die bis zum Erntezeitpunkt Wassergaben erhalten, d. h. für Weidebewuchs und Blattgemüse; sie wird außerdem allgemein für

pflanzliche Nahrungsmittel, wenn die genaue Zusammensetzung unerheblich oder nicht spezifiziert ist.

$$C_r^{\text{Pflanze}} = \frac{W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} \cdot f_w^{\text{Pflanze}}}{y_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} \cdot \lambda_{\text{eff},r,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}} \left( 1 - e^{(-\lambda_{\text{eff},r,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}) \cdot t_w^{\text{Klima,Pflanze}}} \right) \cdot e^{(-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Klima,Pflanze}})} \quad (5.7.1)$$

$W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  Berechnungsrate während der Weidezeit und der Wachstumszeit von pflanzlichen Produkten in l/(m<sup>2</sup> s)

$f_w^{\text{Pflanze}}$  Anteil der auf der Pflanze bzw. dem zum Verzehr bestimmten Pflanzenteil bei Beregnung abgelagerten Aktivität, dimensionslos

$y_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  Gesamtertrag der oberirdischen Teile der verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen in kg(frisch)/m<sup>2</sup>

$\lambda_{\text{eff},r,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  effektive Verweilkonstante des Radionuklids r für das Verbleiben auf den zum Verzehr bestimmten Pflanzenteilen unter unterschiedlichen Klimabedingungen in s<sup>-1</sup>

$$\lambda_{\text{eff},r,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} = \lambda_r + \lambda_{v,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$$

$\lambda_{v,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  Verweilkonstante für das Verbleiben des Radionuklids r auf der Pflanze

$t_w^{\text{Klima,Pflanze}}$  Zeit, in der die verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen durch Beregnung oberflächlich kontaminiert werden, in s

$t_v^{\text{Klima,Pflanze}}$  Zeit zwischen Ernte und Verzehr der verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen in s

### 5.7.3 Interne Kontamination der Pflanzen

Während nach Formel 5.7.1 alle Pflanzen so behandelt werden, als würden ihre Blätter verzehrt, findet beispielsweise bei Kartoffeln keine externe Kontamination durch



direkten Kontakt mit Beregnungswasser statt. Gleichwohl bewirkt die Beaufschlagung der Blätter mit Beregnungswasser eine Radionuklidkonzentration in den Kartoffelknollen, da Radionuklide aus den Blättern in das Speicherorgan verlagert werden. Dieser Vorgang ist als Translokation bekannt. Eine weitere Ursache der internen Radionuklidkonzentration ist die Aufnahme über die Wurzeln aus dem Boden.

Formel 5.7.2 ist geeignet, die Translokation der Radionuklide aus den Blättern in die zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile zu erfassen. Außerdem wird die Diskontinuität der Beregnung beachtet. Daher eignet sich diese Formel, die Radionuklidkonzentration in unterschiedlichen pflanzlichen Nahrungsmitteln, z. B. Wurzelgemüse, Obst und Fruchtgemüse sowie Getreide zu berechnen.

$$C_r^{\text{Pflanze}} = \frac{B_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} \cdot f_w^{\text{Pflanze}} \cdot (1 - f_r^{\text{abs}})}{y_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}} \cdot \left( 1 - e^{(-\lambda_{\text{eff},r,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} \cdot t_b^{\text{Klima,Pflanze}})} \right) \cdot e^{(-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Klima,Pflanze}})} \quad (5.7.2)$$

Dabei bedeuten:

$B_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$	Beregnungsmenge bei der letzten Beregnung vor der Ernte in l/m <sup>2</sup>
$f_r^{\text{abs}}$	Anteil der auf die äußeren Pflanzenteile abgelagerten Aktivität des Radionuklids r, der in die Blätter hinein gelangt
$t_b^{\text{Klima,Pflanze}}$	Zeit zwischen der letzten Beregnung und der Ernte in s

### 5.7.3.1 Translokation

Es sind mindestens zwei Modelle denkbar, nach denen die Translokation beschrieben werden kann:

- Die Radionuklidkonzentration im Zielorgan (z. B. Frucht, Samen oder Speicherwurzel) zum Zeitpunkt der Ernte kann in Abhängigkeit von der Radionuklidkonzentration auf den Blättern zu diesem Zeitpunkt angegeben werden; dieser Faktor wäre rein empirisch und hinge nur vom betrachteten Radionuklid und dem betrachteten Zielorgan ab.

- Ein anderes Modell geht von der gesamten während der Wachstumszeit mit der Beregnung auf die Pflanze aufgetragenen Radionuklidmenge aus. Eine solche Vorgehensweise ist allgemeiner gültig und auch geeignet, die Radionuklidkonzentration im Zielorgan nach einer akuten Beaufschlagung der Blätter zu irgendeinem Zeitpunkt in der Wachstumsphase zu berechnen.

Dies wird in Formel 5.7.3 wiedergegeben, die sich logisch an Formel 5.7.2 anschließt.

$$C_r^{\text{Pflanze}} = W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} \cdot T_R^{\text{Pflanze, Klima}} \cdot 86400 \cdot f_w^{\text{Pflanze}} \cdot f_r^{\text{abs}} \cdot \frac{f_{r, \text{Pflanze}}^{\text{trans}}}{y_{\text{Pflanzenorgan}}^{\text{Klima}}} \cdot e^{\left( -\lambda_r \cdot \left( \frac{T_R^{\text{Pflanze, Klima}}}{2} + t_b^{\text{Klima, Pflanze}} + t_v^{\text{Klima, Pflanze}} \right) \right)} \quad (5.7.3)$$

Es bedeuten:

$T_R^{\text{Pflanze, Klima}}$  Dauer der jährlichen Beregnungszeit für die verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen in Tagen

$f_{r, \text{Pflanze}}^{\text{trans}}$  Der Anteil des absorbierten Radionuklids r, der in das zum Verzehr bestimmte Pflanzenorgan gelangt

$y_{\text{Pflanzenorgan}}^{\text{Klima}}$  Ertrag des zum Verzehr bestimmten Pflanzenorgans unter den verschiedenen Klimabedingungen (kg/m<sup>2</sup>)

In Formel 5.7.3 besteht die Abklingzeit aus der halben Beregnungsdauer, der Zeit zwischen der letzten Beregnung und der Ernte und der Zeit zwischen der Ernte und dem Verzehr.

### 5.7.3.2 Aufnahme aus dem Boden über die Wurzeln

#### Radionuklidkonzentration im Boden

Die Konzentration des Radionuklids r im Boden  $C_{r, \text{Klima}}^m$  unter den Bedingungen einer zeitlich konstanten Zufuhr mit dem Beregnungswasser wird in Anlehnung an /BMU 01/ folgendermaßen berechnet (Formel 5.7.4)

$$C_{r,Klima}^m = \frac{W_{Pflanze}^{Klima} \cdot t_R^{Pflanze,Klima}}{\rho_m^{Klima} \cdot \lambda_{eff,r,m}^{Klima} \cdot 365.25} \cdot \left(1 - e^{(-\lambda_{eff,r,m}^{Klima} \cdot t_b)}\right) \quad (5.7.4)$$

Hierbei bedeuten:

$p_m^{Klima}$  Flächentrockenmasse des Bodens m, in dem die eingetragenen Radionuklide homogen verteilt sind, unter den unterschiedlichen Klimabedingungen, in kg/m<sup>2</sup>

$\lambda_{eff,r,m}^{Klima}$  effektive Verweilkonstante des Radionuklids r im Boden m unter den unterschiedlichen Klimabedingungen in s<sup>-1</sup>  $\lambda_{eff,m}^{Klima} = \lambda_r + \lambda_{r,m}^{Klima}$

$\lambda_{r,m}^{Klima}$  Verweilkonstante des Radionuklids r im Boden m unter unterschiedlichen Klimabedingungen in s<sup>-1</sup>

$t_b$  Zeit, in der sich die Radionuklide im Boden anreichern, in s

### **Aufnahme von Radionukliden über die Wurzel**

Die Ausprägung der Wurzeln ist in den meisten Bodentypen artspezifisch, nicht bodenspezifisch, abgesehen davon, dass die Lage des Grundwasserspiegels für das Wachstum der Wurzeln begrenzend ist. Ein hoher Grundwasserspiegel hat zur Folge, dass Pflanzen mit Pfahlwurzeln wie z. B. viele Bäume nicht wachsen können.

Dass auch andere Bodeneigenschaften einen Einfluss auf die Lage der Wurzeln im Boden haben, ist in Podsolböden zu beobachten. Hier durchquert die Hauptwurzel den in Podsolböden stark sauer reagierenden Aschhorizont A<sub>e</sub> nahezu unverzweigt, so dass sich in diesem Horizont keine Wurzelzone ausbildet. Dagegen werden der 5 bis 10 cm starke Streuhorizont und die Zersetzungsschicht über dem Aschhorizont ebenso wie die weniger stark sauren B-Horizonte unterhalb des Aschhorizontes gut durchwurzelt /HEN 97/.

Pflanzen nehmen Radionuklide aus dem Boden über die Wurzeln auf. Über die Leitungsbahnen werden die Radionuklide in die einzelnen Pflanzenorgane verteilt. Quali-

tativ steht die Aufnahme einerseits mit den Bodeneigenschaften, andererseits mit den Eigenschaften der Pflanzen in Zusammenhang. Ausschlaggebend ist hier in erster Linie das betrachtete Pflanzenorgan, aber es gibt auch radionuklidspezifische Unterschiede zwischen verschiedenen Pflanzenarten.

Die Berechnung der auf der Wurzelaufnahme beruhenden Radionuklidkonzentration in den Pflanzen erfolgt gemäß der Formel 5.4.2.

### **5.8 Pfad: Unter-Glas-Kultur**

Im Treibhaus werden insbesondere Blattgemüse und Obst, unter den Klimabedingungen der Tundra auch Wurzelgemüse gezogen. Die in Abschnitt 5.7 abgeleiteten FEPs und Formeln sind auch hier zutreffend, jedoch unterscheiden sich die Parameter, denn die Randbedingungen für die Kultur im Treibhaus entsprechen nicht in allen Punkten denen für die Kultur im Freiland.

### **5.9 Pfad: Verzehr von Milch und Fleisch von Tieren, die Futter von berechneten Weiden und Feldern erhalten haben**

Es werden keine eigenen Tabellen über die FEPs erstellt. Der Weg vom Beregnungswasser zur Pflanze nach den Tabellen 5.6a und 5.6b gilt auch hier; der weitere Weg vom Futter bis zum verzehrfertigen tierischen Produkt ist in den Tabellen 5.5a und 5.5b enthalten.

Die Berechnungsgrundlagen gehen sämtlich aus der AVV /BMU 01/ hervor; zu ergänzen ist nur, dass die Tiere unwillkürlich etwas Erde, die dem Futter anhaftet, aufnehmen. Damit ist Formel 5.6.1 entsprechend anwendbar.

### **5.10 Pfad: Verzehr von Milch und Fleisch nach Tränkung von Tieren**

Die FEP-Liste für die Viehtränke ist in Tabelle 5.7a (vollständig) und 5.7b (vereinfacht) dargestellt. Dabei trinken Rentiere aus dem Fließgewässer, während Rinder Brunnenwasser erhalten sollen; diese Annahme ist konservativ, weil die Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser wesentlich höher ist.

**Tab. 5.7a:** FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Tränkwasser in Milch und Fleisch

Wasser im Brunnen	Aufbewahrung, Aufbereitung	Aufbewahrung, Aufbereitung	-	-	-
-	Tränkwasser	Verschmutzung durch Gebrauch	-	-	Entnahme
-	-	Wasser im Ausguss	Verzögerung, Klärung	-	-
-	-	-	Wasser im Zulauf zum Fließgewässer	Verdünnung, Sedimentation und Aufwirbelung; chemische Veränderung durch Pflanzen und Plankton	-
-	-	-	-	Wasser im Fließgewässer	Entnahme
-	-	-	Exkremente von Tieren und Menschen	-	Milch, Fleisch

**Tab 5.7b:** Vereinfachte FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Tränkwasser in Milch und Fleisch

Wasser im Brunnen = Tränkwasser	Verdünnung, Sedimentation, Aufwirbelung	Entnahme
-	Wasser im Fließgewässer	Entnahme
-	Exkremente von Tieren und Menschen	Milch, Fleisch

Die Formel zur Berechnung der Radionuklidkonzentration in Milch und Fleisch geht aus /BMU 01/ hervor. Für die Produkte des Hausrindes gilt Formel 5.10.1, für die Produkte des Rentiers Formel 5.10.2.

$$C_r^{\text{Tier}} = C_r^{\text{BW}} \cdot L_{\text{Tier}}^{\text{Klima}} \cdot T_r^{\text{Tier}} \cdot e^{(-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Nahrung}})} \quad (5.10.1)$$

$$C_r^{\text{Tier}} = C_r^{\text{Fließ}} \cdot L_{\text{Tier}}^{\text{Klima}} \cdot T_r^{\text{Tier}} \cdot e^{(-\lambda_r \cdot t_v^{\text{Nahrung}})} \quad (5.10.2)$$

$L_{\text{Tier}}^{\text{Klima}}$  gibt dabei die tägliche Wasseraufnahme des Tieres in l/d an. Alle anderen Zeichen wurden bereits erläutert.

### 5.11 Pfad: orale Aufnahme von Erde

Beim Genuss von schlecht gewaschenen pflanzlichen Lebensmitteln werden geringe Mengen von Erde verspeist. Kinder lecken manchmal auch ihre schmutzigen Finger ab. Die Radionuklidkonzentration im Boden im Überschwemmungsgebiet (Formel 5.4.1), unter beregneten Feldern und Weiden sowie im Treibhaus (Formel 5.7.4) ist aus den bereits beschriebenen Expositionspfaden bekannt.

### 5.12 Pfad: Inhalation von Staub

Bei der Winderosion gelangen Erdpartikel in die Atmosphäre. Quelle für diesen Pfad kann neben dem Boden von beregneten Feldern auch Erde aus Treibhäusern, die ausgetauscht wurde und im Freien lagert, sein. Der Pfad tritt nur auf, wenn mehrere Randbedingungen gleichzeitig gegeben sind:

- Die Bedeckung des Bodens mit Pflanzen fehlt weitgehend.
- Es herrscht trockenes Wetter und die trockene Wetterlage hält so lange an, bis die oberen Bodenschichten abtrocknen; die hierzu notwendige Dauer ist abhängig von Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Windgeschwindigkeit.
- Der Boden wird durch landwirtschaftliche Bearbeitung wie Pflügen und Eggen oder durch eine hohe Windgeschwindigkeit aus der Ruhelage gebracht.
- Der inhalierende Mensch befindet sich nahe an der Stelle, an der der Boden aufgewirbelt wurde, denn andernfalls würde in Anbetracht der Kleinräumigkeit des kontaminierten Gebietes eine Verdünnung des Staubs in der Luft durch Verwirbelung mit dem Winde erfolgen.

Diese Randbedingungen legen nahe, dass die einzige Situation, in der dieser Pfad einen signifikanten Beitrag zur Strahlenexposition liefern kann, den Bauern bei der Feldarbeit betrifft.

Die Berechnung der Aerosolgebundenen Radionuklidkonzentration  $C_r^{\text{Klima,Luft}}$  in der bodennahen Luft erfolgt nach Formel 5.12.1.

$$C_r^{\text{Klima,Luft}} = C_{r,m}^{\text{Klima}} \cdot C_L^{\text{Klima,Staub}} \quad (5.12.1)$$

Dabei symbolisiert  $C_L^{\text{Klima,Staub}}$  den Staubgehalt in der bodennahen Luft.

### 5.13 Pfad: Inhalation von Wasserdampf

Dieser Pfad tritt vornehmlich in Treibhäusern auf, da dort die Luftfeuchtigkeit hoch ist und da diese Luftfeuchtigkeit z. T. aus dem Beregnungswasser stammt. Deutlich geringer ist die potentielle Strahlenexposition bei der Beregnung von Feldern und Wäldern, da sich das durch Evapotranspiration in die Atmosphäre gelangende Beregnungswasser schnell ausbreitet und verdünnt. Zu beachten ist, dass die Radionuklidkonzentration in der Luftfeuchtigkeit im Treibhaus geringer ist als im Beregnungswasser. Die Abreicherung hat zwei Gründe: 1.) sind die meisten gelösten Radionuklide deutlich schwerer flüchtig als Wasser und verbleiben daher in der flüssigen Phase und 2.) entsteht ein Teil der Wasserdampfkonzentration im Treibhaus durch Evapotranspiration; die Radionuklidkonzentration dieses Anteils wird extrem gering sein. Eine Ausnahme bilden die Radionuklide C 14, Sn 126 und I 129. Der Dekontaminationsfaktor  $D_r$  ist radionuklidabhängig.

Formel 5.13.1 zeigt die Berechnung der Radionuklidkonzentration in Luft  $C_r^{\text{Luft}}$ .

$$C_{r,\text{Wasser}}^{\text{Luft}} = C_r^{\text{BW}} \cdot C_{\text{Wasser}}^{\text{L}} \cdot D_r \quad (5.13.1)$$

Hier gibt  $C_{\text{Wasser}}^{\text{L}}$  den Wassergehalt in der Luft eines Treibhauses an.

### 5.14 Pfad: Externe Strahlenexposition

Beim Aufenthalt am Ufer, im Überschwemmungsgebiet, auf beregneten Feldern und Weiden und im Treibhaus ist der Mensch einer äußeren Strahlenexposition ausgesetzt. Außerdem findet eine externe Strahlenexposition bei einer Vielzahl von Beschäftigungen statt: beim Duschen mit Brunnenwasser, beim Aufenthalt im Stall, wenn die Tiere auf Stroh lagern, ebenso im Schlaf, falls eine Strohmattatze gewählt wird, und allgemein bei Aufenthalt in einem Gebäude, wenn das Bau- oder Möbelholz aus dem Überschwemmungsgebiet stammt.

Quantitativ relevant ist von diesen Expositionspfaden nur der Aufenthalt auf berechneten Feldern und Weiden oder im Treibhaus; in den Szenarien, in denen eine Berechnung nicht angenommen wird, ist auch die externe Strahlenexposition am Flussufer zu untersuchen. Bei den übrigen Pfaden ist entweder die Radionuklidkonzentration im umgebenden Medium nur gering oder die Expositionszeit vergleichsweise kurz.

Die Berechnung der externen Strahlenexposition an den verschiedenen Aufenthaltsorten (Substraten) erfolgt gemäß Formel 5.1.3. Grundlage ist die flächenbezogene Belegung des Substrats durch das Radionuklid  $r$  in  $\text{Bq}/\text{m}^2$ . Die Formel für die Belegung des Ufersediments  $O_r^{\text{Sediment}}$  (Formel 5.14.1) und für die Belegung des Bodens im Überschwemmungsgebiet  $O_{r,m}^{\text{ÜBoden}}$  (Formel 5.14.3) lassen sich aus Angaben in /BMU 01/ ableiten; ergänzt wird die Belegung von berechneten Feldern und Weiden in den verschiedenen Klimasituationen  $O_{r,m}^{\text{Klima}}$  nach Formel 5.14.4.

$$O_r^{\text{Sediment}} = \frac{\rho_{\text{Se}} \cdot v_{\text{Se}} \cdot C_r^{\text{Sch}}}{\lambda_r} \cdot \left(1 - e^{(-\lambda_r \cdot t_{\text{Se}})}\right) \quad (5.14.1)$$

Hierbei bedeuten:

$\rho_{\text{Se}}$  Dichte des Sediments (Trockenmasse) in  $\text{kg}/\text{m}^3$

$v_{\text{Se}}$  Sedimentationsgeschwindigkeit in  $\text{m}/\text{s}$

$t_{\text{Se}}$  Sedimentationszeit bis zu einer Sedimentstärke von 5 cm in s

$C_r^{\text{Sch}}$  Konzentration des Radionuklids  $r$  im Schwebstoff

$$C_r^{\text{Sch}} = C_r^{\text{Fließ}} \cdot K_F^r \quad (5.14.2)$$

Der Konzentrationsfaktor für Radionuklide in Sedimenten  $K_F^r$  wird in  $\text{l}/\text{kg}$  angegeben.

Die Belegung der Oberfläche im Überschwemmungsgebiet mit dem Radionuklid  $r$  lässt sich aus Formel 5.14.3 für die Berechnung der Konzentration des Radionuklids  $r$



im Boden des Überschwemmungsgebietes berechnen. Sie entspricht der Belegung in den obersten 5 cm. Damit ergibt sich:

$$O_{r,m}^{\text{Üboden}} = C_r^{\text{Üboden}} \cdot \frac{U_r \cdot p_m}{U_m^{\text{Üboden}}} \quad (5.14.3)$$

Hierbei bedeutet  $U_m^{\text{Üboden}}$  die Stärke der gut durchwurzelten Schicht des Bodens  $m$  im Überschwemmungsgebiet und  $U_r$  die effektive Schichtdicke, die für die Berechnung der Strahlenexposition durch  $\gamma$ -Strahler maßgeblich ist. Diese Schichtdicke wird angenommen, um die Selbstabschirmung zu berücksichtigen.

In ähnlicher Weise wird die oberflächliche Belegung des Bodens von berechneten Feldern und Weiden mit dem Radionuklid  $r$   $O_{r,m}^{\text{Klima}}$  aus der Konzentration dieses Radionuklids im Boden  $C_{r,m}^{\text{Klima}}$  (Formel 5.7.4) berechnet: Formel 5.14.4.  $U_m^{\text{Klima}}$  ist dabei die Stärke des Bodens in den verschiedenen Klimasituationen bei den einzelnen Pflanzenkulturen.

$$O_{r,m}^{\text{Klima}} = C_{r,m}^{\text{Klima}} \cdot \frac{U_r \cdot p_m^{\text{Klima}}}{U_m^{\text{Klima}}} \quad (5.14.4)$$

Im Treibhaus liegen etwas andere Verhältnisse als im Freiland vor, denn der Boden liegt hier nicht immer zu Füßen des Menschen sondern in vielen Fällen knie- bis hüft-hoch; zum Zwecke der Energie- und Wassereinsparung können die Pflanzen im Treibhaus auch in mehreren Stockwerken gezogen werden, wenn die Beleuchtung gesichert ist. Hierdurch ändert sich nicht die Formel für die Konzentration im Boden, wohl aber der Wert des Dosisfaktors  $g_{b,r,T}$ .

## 6 Parameterwerte

### 6.1 Angaben über Ingestions- und Inhalationsraten sowie den Aufenthalt in kontaminierten Gebieten

Diese Angaben wurden in Abschnitt 4 ermittelt und werden im folgenden noch einmal zusammengefasst.

Die Aufnahmeraten U für die verschiedenen Nahrungsmittel gehen aus Tabelle 6.1 (pflanzliche Nahrungsmittel) und 6.2 (Trinkwasser und tierische Nahrungsmittel) hervor.

**Tab. 6.1** Zusammensetzung der Nahrungskörbe (pflanzliche Lebensmittel)

Klima	Beeren (wild)	Pilze (wild)	Wurzel- gemüse	Obst, Frucht- gemüse	Blattgemüse u. ä.	Getreide
	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)
ET I	50	40	0	0	0	0
ET II	50	40	220 Treibhaus	90 Treibhaus	60 Treibhaus	0
Df I	60	70	0	0	0	0
Df II	60	60	220 Treibhaus	90 Treibhaus	60 Treibhaus	0
Df III	60	50	170 Freiland	90 Treibhaus	60 Treibhaus + 90 Freiland	90
Dw I	60	70	0	0	0	0
DwII	60	60	240 Treibhaus	90 Treibhaus	60 Treibhaus	0
Dw III	50	40	200 Freiland	90 Treibhaus	60 Treibhaus + 100 Freiland	110
Cf a	0	0	130 Freiland	150 Freiland	70 Freiland	110
Cf b	0	0	140 Freiland	140 Freiland	50 Freiland	150
Cf c	0	0	120 Freiland	150 Freiland + 80 Treib- haus	30 Freiland + 70 Treibhaus	100
Cs a	0	0	50	320+ 20   Öl	70	100
Cs b	0	0	80	330 + 20   Öl	100	130

**Tab. 6.2** Zusammensetzung der Nahrungskörbe (Wasser, tierische Nahrungsmittel)

	Trinkwasser	Fisch	Rentier-Milch	Rentier-Fleisch	Kuhmilch	Rindfleisch
	(l/a)	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)	(kg/a)
ET I	700	70	310	160	0	0
ET II	700	70	240	100	0	0
Df I	700	100	0	0	360	220
Df II	700	60	0	0	300	180
Df III	700	50	0	0	150	120
Dw I	800	0	0	0	390	290
DWII	800	0	0	0	300	220
DW III	800	0	0	0	150	120
Cf a	800	0	0	0	160	110
Cf b	800	0	0	0	130	70
Cf c	800	0	0	0	160	120
Cs a	1000	0	0	0	100	80
Cs b	1000	0	0	0	60	40

- ET I Tundra, keine Nutzung von Treibhäusern  
 ET II Tundra, Nutzung von Treibhäusern  
 Df I Feuchtwinterkaltes Klima, nördliche Zone ohne Nutzung von Treibhäusern  
 Df II Feuchtwinterkaltes Klima, nördliche Zone mit Nutzung von Treibhäusern  
 Df III Feuchtwinterkaltes Klima, südliche Zone, Nutzung von Treibhäusern und Feldern  
 Dw I Wintertrockenes Klima, nördliche Zone ohne Nutzung von Treibhäusern  
 DwII Wintertrockenes Klima, nördliche Zone mit Nutzung von Treibhäusern  
 Dw III Wintertrockenes Klima, südliche Zone, Nutzung von Treibhäusern und Feldern  
 Cf a Feuchtgemäßigtes Klima, viel tierisches Eiweiß, keine Treibhäuser  
 Cf b Feuchtgemäßigtes Klima, weniger tierisches Eiweiß, keine Treibhäuser  
 Cf c Feuchtgemäßigtes Klima, viel tierisches Eiweiß, Treibhäuser  
 Cs a Etesienklima, relativ viel tierisches Eiweiß  
 Cs b Etesienklima, wenig tierisches Eiweiß

Die angenommene Atemrate beträgt beim Pflügen und bei der Arbeit im Treibhaus in Anlehnung an /BMU 94/  $3.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , im übrigen aber  $2.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  /BMU 01/.

Die angenommene Dauer der Aufenthaltszeit an den verschiedenen Orten geht aus Tabelle 6.3 hervor. Die Aufenthaltsdauer in den verschiedenen belasteten Gebieten wird an Hand der Ernährungsgewohnheiten geschätzt mit der Maßgabe, dass die gesamte Ernte des Dorfes von einem einzigen Bauern erzeugt wird, aber in der Viehwirtschaft werden in den meisten Szenarios mindestens zwei Arbeitskräfte benötigt. Der Arbeitsaufwand im Freien wird in Anlehnung an /RUH 85/ auf 100 h/ha Kartoffeln geschätzt, 200 h/ha Obst und Gemüse, 30 h/ha Getreide und 10 min/(Rind \* Weidetag). Bezüglich des Freizeitverhaltens wird ein jährlicher Aufenthalt von 1000 Stunden außerhalb von Gebäuden, in der Tundra und im Norden der Klimagebiete Df und Dw jedoch nur von 300 Stunden zugrunde gelegt, weil weite Teile des Gebietes unbelas-

tet sind. Diese Zeit wird an Hand der Gegebenheiten auf Überschwemmungsgebiet, Weiden und Felder verteilt. Der Arbeitsaufwand im Treibhaus wird auf 1000 h/ha Treibhausfläche geschätzt; in den kälteren Klimaten werden daher zwei Arbeitskräfte benötigt.

**Tab. 6.3** Aufenthaltsdauer in den verschiedenen Gebieten

Klima	Überschwemmungsgebiet	Treibhaus	Acker	Weide
	(h/a)	(h/a)	(h/a)	(h/a)
ET I	1000			
ET II	1000	1000		
Df I	1000			
Df II	1000	1000		
Df III	1000	500	600	1400
Dw I	900 (Ufer)			400
DwII	1000 (Ufer)	1000		400
Dw III	700 (Ufer)	500	600	1000
Cf a			600	1100
Cf b			600	1000
Cf c		300	600	1100
Cs a			600	1700
Cs b			600	1100

Um die Unterschiedlichkeit der Strahlenexposition unter den verschiedenen Randbedingungen zu beurteilen, reicht es aus, die effektive Dosis des Erwachsenen zu bestimmen. Die Dosisfaktoren für die Strahlenexposition durch Ingestion  $g_{g,r,T}$ , durch Inhalation  $g_{h,r,T}$  und durch externe Bestrahlung  $g_{b,r,T}$  gehen aus /BFS 00/ hervor.

## 6.2 Pfad: Trinkwasserverzehr

Die nach Gleichung 5.2.1 benötigten Angaben sind die Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser  $C_r^{BW}$ , der Verbrauch  $U_{Klima}^{Trinkwasser}$  (siehe Tabelle 6.2) und der Dosisfaktor  $g_{g,r,T}/BFS\ 00/$ .

## 6.3 Pfad: Fischverzehr

Der Abfluss des Baches/Flusses am Endlager unter anderen als heutigen Klimabedingungen kann nicht vorausgesagt werden, aber die Größenordnung lässt sich abschätzen, da der natürliche Abfluss des Flusses dem im Einzugsbereich des Flusses

gefallenen Niederschlag abzüglich von Evapotranspiration und Versickerung entspricht.

Unter heutigen Klimabedingungen betragen die mittleren Abflüsse der Löcknitz bei Gadow  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  und der Jeetzel bei Lüchow  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$  /DGJ 90/. Aus Angaben in /DGJ 90/ lässt sich die mittlere Abflussspende in beiden Fällen zu etwa  $5 \text{ l}/(\text{s km}^2)$  Wassereinzugsgebiet berechnen. Die Niederschlagshöhe in diesem Gebiet liegt mit rund  $570 \text{ mm/a}$  zwischen denen der Stationen Stykkisholmur /UKA 98/ und Isfjord /SCH 94/ ( $378$  und  $693 \text{ mm/a}$ ). Die Evapotranspirationsrate ist in der Tundra sehr gering, die Versickerungsrate in der kalten Jahreszeit ebenfalls. Es wird daher vorgeschlagen, von einer Abflussrate des Vorfluters in Höhe von  $MQ = 1 \text{ m}^3/\text{s}$  auszugehen.

Die mittlere Radionuklidkonzentration im Flusswasser ergibt sich aus der Konzentration im Brunnenwasser und dem Anteil des aus dem Brunnen stammenden Wassers am mittleren Abfluss des Flusses, siehe Formel 5.3.1. Dabei wird die in den Fluss abgeleitete Wassermenge  $Q^{\text{Haushalt}}$  in  $\text{m}^3/\text{s}$  angegeben. Die Zeitverzögerung zwischen Entnahme aus dem Brunnen und Einspeisung in das Fließgewässer wird vernachlässigt.

Zur Prüfung, ob diese Gewässergröße ausreicht, den für die Ernährung nötigen jährlichen Fang bereitzustellen, wird ein jährlicher Fang von  $200 \text{ kg Fisch/ha}$  Flussfläche angenommen, vgl. /KWU 78/. Wenn der essbare Teil eines Fisches  $52 \%$  beträgt /SOU 82/ müssen für  $20$  Personen  $2700 \text{ kg}$  Fisch gefangen werden, dafür würden  $13.5 \text{ ha}$  Flussfläche gebraucht. Wenn die Wasserführung  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt, der Fluss  $0.5 \text{ m}$  tief ist und  $1 \text{ m/s}$  schnell fließt, ist der benötigte Flussabschnitt fast  $70 \text{ km}$  lang. Damit ist klar, dass es unmöglich ist, den gesamten für die Ernährung von  $20$  Menschen notwendigen Fisch aus dem Vorfluter am Standort zu holen.

Es gibt zwei Lösungsmöglichkeiten für dies Problem:

- Der Fluss führt mehr Wasser, oder der Vorfluter ist ein See.
- Nur ein Teil des benötigten Fisches stammt aus dem Vorfluter unterhalb der Einleitungsstelle, der größte Teil des Fisches wird nicht vom Endlager beeinflusst.

Im Ergebnis führen beide Alternativen zu einer rechnerischen Verringerung der Radionuklidaufnahme über die Ingestion von Fisch. Da es unmöglich ist, den gesamten Fischbedarf aus dem Vorfluter zu decken, wird der Anteil des Fisches, der aus dem Vorfluter unterhalb der Einleitungsstelle stammt, willkürlich ermittelt unter der Annahme, dass die Fischer maximal 10 km weit zum Fang ausfahren.

Neben der Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser  $C_r^{BW}$ , dem Fischkonsum  $U_{Gesamt}^{Fisch}$  (siehe Tabelle 6.2) und dem Dosisfaktor  $g_{g,r,T}$ , dem Mischungsverhältnis zwischen Brunnenwasser und Vorfluter  $Q^{Haushalt}/MQ$  und dem Anteil des verzehrten Fisches, der aus dem Vorfluter stammt  $U_{Fließ}^{Fisch}/U_{Gesamt}^{Fisch}$  (Tabelle 6.4) werden die radionuklidspezifischen Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch  $T_r^{Fi}$ , bezogen auf ungefiltertes Wasser, aus Tabelle 6.5 benötigt. Die Konzentrationsfaktoren für Samarium entsprechen denen für Europium /COU 85/. Ebenso wurde der Konzentrationsfaktor von Strontium auf Kalzium übertragen. Für Palladium lagen keine Angaben vor.

**Tab. 6.4** Parameterwerte für den Pfad „Fischverzehr“

	Tundrenklima	Boreales Waldklima
MQ (m <sup>3</sup> /a)	$3.16 \cdot 10^7$	$3.16 \cdot 10^7$
$Q^{Haushalt}$ (m <sup>3</sup> /a)	731	731
$U_{Fließ}^{Fisch}/U_{Gesamt}^{Fisch}$	0.15	I 0.1 II 0.175 III 0.2

**Tab. 6.5** Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch

Element	Konzentrationsfaktor $T_r^{Fi}$ in l/kg	Zitat	Element	Konzentrationsfaktor $T_r^{Fi}$ in l/kg	Zitat
C	80000	/BMU 01/	Cs	1500	/BMU 01/
Cl	50	/COU 85/	Sm	50	Wie Eu
Ca	30	Siehe Text	Eu	50	/IAEA 94/
Co	100	$3.29/(Co)_w^{0.74}$	Pb	60	/BMU 01/
Ni	100	/BMU 01/	Po	300	/BMU 01/
Se	200	/BMU 01/	Ra	10	/BMU 01/
Rb	2000	/BMU 01/	Ac	30	/BMU 99/
Sr	30	/BMU 01/	Th	30	/BMU 01/
Zr	200	/BMU 01/	Pa	30	/BMU 99/
Nb	200	/BMU 01/	U	2	/BMU 01/
Mo	20	/COU 85/	Np	10	/BMU 01/
Tc	80	/BMU 01/	Pu	8	/BMU 01/

Pd	100	Ohne Zitat	Am	25	/BMU 01/
Sn	3000	/BMU 01/	Cm	25	/BMU 01/
I	50	/BMU 01/			

$(Co)_w$  und  $(K)_w$  bezeichnen die jeweilige Elementkonzentration in  $\mu\text{g/l}$  Wasser.

#### 6.4 Pfad: Beeren und Pilze aus Überschwemmungsgebieten

Die meisten benötigten Parameterwerte wurden bereits abgeleitet. Neu sind:

- Das Verhältnis der Wasserführung bei Hochwasser HQ und Mittelwasser MQ. HQ/MQ betrage willkürlich 3.
- Die radionuklidspezifische Übergangskonstante  $K_e^r$  für den Nahbereich, siehe Tabelle 6.6 /BMU 01/. Der Nahbereich wird gewählt, weil es für wahrscheinlich gehalten wird, dass Beeren und Pilze hauptsächlich in der näheren Umgebung des Standorts gesucht werden.

**Tab. 6.6** Elementspezifische Übergangskonstanten  $K_e^r$  /BMU 01/

Gruppe	$K_e^r$ in $10^{-5} \text{ l/m}^2 \text{ s}$	Elemente
1	2	Tc, Te, Ra, Nb
2	30	Cs, I, Lanthaniden
3	60	Co, Ni, Zr, Aktiniden

Nicht aufgeführte Elemente sind gemäß ihrer chemischen Verwandtschaft zu den Elementgruppen zuzuordnen.

- Das Myzel der verschiedenen Pilze lebt in unterschiedlich tiefen Bodenschichten. Hier wird konservativ angenommen, dass die Schicht allgemein 10 cm tief ist; damit liegt die Flächentrockenmasse bei  $120 \text{ kg/m}^2$ . Die Konstante  $\lambda_u$  für den Abbau von Radionukliden aus der obersten Bodenschicht durch das Eindringen in tiefere Schichten und den Abtransport mit dem nächsten Hochwasser beträgt  $3 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  /BMU 01/.
- Die Zeit  $t_v^{\text{Klima,Pflanze}}$  zwischen Ernte und Verzehr von Beeren und Pilzen betrage für beide Pflanzen und Klimabedingungen  $10^7 \text{ s}$  (116 Tage). Dieser Wert ist etwa doppelt so hoch wie der in /BMU 01/ für gelagerte Pflanzen angesetzt, weil im

Szenario ein großer Anteil des jährlichen Konsums an Pflanzen aus Beeren und Pilzen gedeckt wird, deren Erntezeit auf wenige Wochen pro Jahr beschränkt ist.

- Die Transferfaktoren für den Übergang einiger Radionuklide aus dem Boden in Beeren und Pilze gehen aus Tabelle 6.7 hervor. Sie gelten unabhängig von den Klimabedingungen. Nur die Angaben für Caesium sind abgesichert, im übrigen liegen nur wenige Messwerte vor. Im Fall der in Tabelle 6.7 nicht aufgeführten Radionuklide wird empfohlen, für Beeren einstweilen die in /BMU 01/ für Weidebewuchs geltenden Transferfaktoren zu benutzen, siehe Tabelle 6.8. Für Pilze sind diese Transferfaktoren mit einem Sicherheitszuschlag von 10 zu versehen.

**Tab. 6.7** Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Boden von Überschwemmungsgebieten in Beeren und Pilze

Element	$T_r^{\text{Beere}}$ in kg Boden (TM) / kg Beeren (FM)	Grundlagen	$T_r^{\text{Pilz}}$ in kg Boden (TM) / kg Pilze (FM)	Grundlagen
Co	0.001	/BAR 98a, BAR 98b/	0.002	/BAR 98a, BAR 98b/
Ni	0.01	/BAR 98a, BAR 98b/	0.01	/BAR 98a, BAR 98b/
Sr	0.05	/GRE 97, ROU 84/	0.001	/BAR 98a, BAR 98b/
Cs	0.01	/GRE 97, ROU 84/	2	/LOR 96, RÜH 98, TSU 98/
Pb	0.005	/BAR 98a, BAR 98b/	0.01	/BAR 98a, BAR 98b/
Pu	0.00003	/GRE 97/		
Am	0.00003	/GRE 97/		

Die Angaben für Beeren beruhen in der Hauptsache auf verschiedenen einheimischen Beerenfrüchten, außerdem wurden Angaben für Äpfel verarbeitet /GRE 97, ROU 84/. Aus der Kombination von /BAR 98a/ und /BAR 98b/ lassen sich Transferfaktoren für Strontium in Beerenfrüchte der Taiga gewinnen, die deutlich unter den oben genannten liegen.

Der Transferfaktor für die Aufnahme von Cs in Pilze kann für eine Mischung aus Pilzen mit relativ hohem Transferfaktor gelten, z. B. für Pfifferlinge, Butterpilze, Steinpilze. Röhrlinge haben häufig noch höhere Transferfaktoren, während viele andere Pilze, z.B. Champignons, wesentlich kleinere aufweisen. Große Unterschiede in den Transferfaktoren bleiben auch bestehen, wenn die Konzentration in der Bodenschicht, in der die Pilzfäden leben, berücksichtigt wird /RÜH 98/. Neben den in Tabelle 6.7



genannten Zitaten wurden auch Angaben in /UOI 99/ für die Konzentration in Pilzen und in /BMU 95/ für die Konzentration im Boden benutzt.

Abgesehen vom Transferfaktor für Cs für Pilze sind alle in Tabelle 6.7 angegebenen Transferfaktoren kleiner als die in Tabelle 6.8 und Tabelle 6.24 gezeigten Transferfaktoren der AVV /BMU 01/. Im Fall der Beeren beruht dies darauf, dass die Transferfaktoren der AVV insbesondere für die Blätter der Pflanzen gelten. Transferfaktoren für Früchte sind allgemein kleiner als für Blätter, siehe auch Angaben in /COU 85/.

### 6.5 Pfad: Pflanzenzucht im Überschwemmungsgebiet

Für die Berechnung der Radionuklidkonzentrationen in landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, die im Überschwemmungsgebiet wachsen, gelten die gleichen Grundsätze wie für die natürliche Vegetation. Unterschiedlich sind nur einige Parameterwerte, nämlich die für die Flächentrockenmasse der Böden und der Transfer der Radionuklide aus dem Boden in die zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile.

Die Flächentrockenmasse der Hauptwurzelzone von Weiden beträgt  $p^m = 120 \text{ kg/m}^2$ , die Flächentrockenmasse der bearbeiteten Böden (Äcker)  $p^m = 280 \text{ kg/m}^2$  /BMU 01/. Diese Werte können für alle betrachteten Klimabedingungen gelten.

**Tab. 6.8** Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Boden in Weidebewuchs

Element	$T_r^{\text{Weide}}$ Bq/kg Pflanze (FM) : Bq/kg Boden (TM)	Element	$T_r^{\text{Weide}}$ Bq/kg Pflanze (FM) : Bq/kg Boden (TM)
C		Cs	0.05
Cl	5	Sm	0.003
Ca	0.2	Eu	0.003
Co	0.02	Pb	0.01
Ni	0.02	Po	0.01
Se	0.5	Ra	0.01
Rb	0.9	Ac	0.003
Sr	0.4	Th	0.002
Zr	0.001	Pa	0.003
Nb	0.01	U	0.003
Mo	0.2	Np	0.02
Tc	3	Pu	0.00008
Pd	0.02	Am	0.0003

Sn	0.2	Cm	0.0003
I	0.1		

Die Transferfaktoren für die Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden über die Wurzel in Weidebewuchs gehen aus Tabelle 6.8 hervor. Quelle ist für alle Elemente außer den natürlichen Radionukliden Uran, Protaktinium, Thorium, Aktinium, Radium, Blei und Polonium die AVV /BMU 01/, für die genannten Radionuklide dagegen /BMU 99/. Die Transferfaktoren für andere Pflanzen stehen in Tabelle 6.25.

## 6.6 Pfad: Viehzucht im Überschwemmungsgebiet

Dieser Pfad gilt einerseits für die Rentierzucht in der Tundra, andererseits für Viehzucht im feuchtwinterkalten Klima, jedoch nur dann, wenn unterstellt wird, dass keine Treibhäuser zur Verfügung stehen. Andernfalls ist der Eintrag von Radionukliden in die Biosphäre über die Beregnung in den Treibhäusern so viel höher als durch Überschwemmungen, dass der Weidegang im Überschwemmungsgebiet keine Rolle spielt.

Rentiere ernähren sich zu einem bedeutenden Teil von der Rentierflechte, die im Überschwemmungsgebiet nicht wächst. Der Weidegang im Überschwemmungsgebiet ermöglicht dagegen die Aufnahme von Gräsern, Kräutern, Beeren und Pilzen. Dabei werden Beeren nicht äußerlich kontaminiert sein, denn die Überschwemmungen treten vorwiegend während und kurz nach der Schneeschmelze auf, also noch vor der Blütezeit. Gräser und Kräuter, die quantitativ den größeren Teil der Nahrung bilden, werden dagegen auch äußerlich kontaminiert sein.

Es wird davon ausgegangen, dass der Weidebewuchs für die Rinder nicht äußerlich kontaminiert ist, weil das Gras in der Überschwemmungszeit noch nicht Schnittrif ist und auch noch nicht abgeweidet werden kann. Die Radionuklidkonzentration im Weidebewuchs wird nach den Methoden der AVV /BMU 01/ berechnet. Transferfaktoren zur Ermittlung der Radionuklidkonzentration in frischem Weidebewuchs gehen aus Tabelle 6.8 hervor.

Die tägliche Futteraufnahme eines Rentieres wurde in Abschnitt 4.2.5 zu 6.5 kg Trockensubstanz abgeschätzt, also 32.5 kg Frischfutter. Auf Grund der Nettoprimärproduktion des in Fragen kommenden Gebietes und des Nahrungsbedarfes der Tiere

können die Tiere nur wenige Tage im Jahr im Überschwemmungsgebiet unterhalb der Einleitungsstelle weiden, wie in Abschnitt 4.2.5 plausibel gemacht wird. Es wird willkürlich angenommen, dass sie unter den Bedingungen der nördlichen Tundra 1 % und in der Waldtundra 5 % ihrer Nahrung aus dem Überschwemmungsgebiet am Vorfluter erhalten.

Die tägliche Futteraufnahme des Rindes beträgt nach /BMU 01/ 65 kg frischer Weidebewuchs, solange dieser zur Verfügung steht; in der übrigen Zeit ist das Futter anders zusammengesetzt, die Menge entspricht jedoch, bezogen auf die Trockensubstanz, ebenfalls 65 kg frischem Weidebewuchs.

Die Vegetationszeit im feuchtwinterkalten Klima liegt definitionsgemäß zwischen 30 Tagen im Übergangsgebiet zur Tundra und 120 Tagen im Übergangsgebiet zum feuchtgemäßigtem Klima. Dementsprechend muss das Futter bis zu acht bzw. elf Monate lang gelagert werden; die mittlere Lagerzeit daher beträgt daher  $1.4 \cdot 10^7$  s im Norden bzw.  $10^7$  s im Süden. Rentiere nehmen nur Frischfutter, kein Lagerfutter auf.

Die Transferfaktoren für den Übergang von Radionukliden aus dem Futter in Milch und Fleisch gehen aus Tabelle 6.9 hervor. Quelle für die Transferfaktoren in Kuhmilch und Rindfleisch ist /BMU 01/; davon abweichend wurde der Transferfaktor für Selen in Kuhmilch nach /PRÖ 95/ gewählt; dieser Transferfaktor geht auf Messwerte zurück, berücksichtigt das Verhältnis der Selen-Konzentration in Milch und Fleisch und liegt im oberen Bereich der in /COU 85/ abgeleiteten Werte. Die Ableitung des Transferfaktors für Technetium in Kuhmilch folgt weiter unten. Die Transferfaktoren für Rentiermilch und -fleisch sind als vorläufig zu verstehen. Sie wurden in Ermangelung eines besseren Verfahrens folgendermaßen festgelegt: Transferfaktoren für Schafe und Ziegen aus /IAEA 94/ wurden direkt übertragen; wenn auch in /IAEA 94/ keine Angaben gemacht werden, wird angesetzt, dass die Transferfaktoren für Rentiermilch jeweils 50mal so hoch wie für Kuhmilch und die für Rentierfleisch 10mal so hoch wie für Rindfleisch sind. Diese Erhöhungsfaktoren geben etwa das mittlere Verhältnis der Transferfaktoren für Produkte von Ziegen und Schafen nach /IAEA 94/ und von Rindern nach /BMU 01/ wieder. Im Fall von Tc 99 wird umgekehrt vorgegangen. Aus dem gemessenen Transferfaktor für Ziegenmilch /ENN 89/ wird der Transferfaktor für Kuhmilch erschlossen. Der Transferfaktor für Cs 137 in Rentierfleisch wurde nach dem Verfahren von /NAL 96/ für ein Rentier von 200 kg Körpergewicht (siehe Abschnitt 4.5) berechnet.

Außer Futter nehmen die Tiere auch Erde auf, insbesondere wenn ihnen keine Salzlecke zur Verfügung steht. Rinder nehmen täglich 0.5 kg Boden auf /BMU 99/; dieser Wert wird auf Grund des schüttereren Pflanzenwuchses in der Tundra direkt auf Rentiere übertragen.

Es wird unterstellt, dass Milch frisch verzehrt wird, während 20 Tage zwischen der Schlachtung und dem Verzehr von Rind- oder Rentierfleisch liegen ( $t_v^{\text{Fleisch}} = 1.7 \cdot 10^6 \text{ s}$  /BMU 01/).

**Tab. 6.9** Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Futter in Milch und Fleisch von Rindern und Rentieren

Element	$T_r^{\text{Kuhmilch}}$	$T_r^{\text{Rindfleisch}}$	$T_r^{\text{Rentiermilch}}$	$T_r^{\text{Rentierfleisch}}$	Verfahren für Rentiermilch	Verfahren für Rentierfleisch
C	0.02	0.02	1	0.2	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Cl	0.02	0.08	1	0.8	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Ca	0.02	0.001	1	0.01	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Co	0.0002	0.01	0.01	0.06	aus /BMU 01/	/IAEA 94/
Ni	0.01	0.002	0.5	0.02	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Se	0.004	0.02	0.2	0.2	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Rb	0.006	0.01	0.3	0.2	aus /BMU 01/	/IAEA 94/
Sr	0.002	0.0006	0.04	0.02	/IAEA 94/	/IAEA 94/
Zr	$5 \cdot 10^{-6}$	0.02	$6 \cdot 10^{-6}$	0.2	/IAEA 94/	aus /BMU 01/
Nb	0.003	0.3	$7 \cdot 10^{-6}$	0.0002	/IAEA 90/	/IAEA 94/
Mo	0.002	0.007	0.009	0.07	/ENN 89/	aus /BMU 01/
Tc	0.0002	0.04	0.01	0.4	/IAEA 94/	aus /BMU 01/
Pd	0.01	0.004	0.5	0.04	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Sn	0.003	0.08	0.2	0.8	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
I	0.003	0.01	0.5	0.03	/IAEA 94/	/IAEA 94/
Cs	0.005	0.03	0.08	0.05	/IAEA 94/	/NAL 96/
Sm	$2 \cdot 10^{-5}$	0.005	0.001	0.05	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Eu	$2 \cdot 10^{-5}$	0.005	0.001	0.05	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Pb	0.0003	0.0004	0.02	0.004	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Po	0.0003	0.005	0.02	0.05	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Ra	0.003	0.0009	0.2	0.009	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Ac	$2 \cdot 10^{-5}$	0.06	0.001	0.6	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Th	$5 \cdot 10^{-6}$	0.0002	0.0003	0.0002	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Pa	$5 \cdot 10^{-6}$	0.005	0.0003	0.05	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
U	0.0005	0.0004	0.03	0.004	aus /BMU 01/	aus /BMU 01/
Np	$5 \cdot 10^{-6}$	0.0002	0.0001	0.002	/IAEA 94/	aus /BMU 01/
Pu	$1 \cdot 10^{-7}$	0.0003	$1 \cdot 10^{-5}$	0.0001	/IAEA 94/	/IAEA 94/
Am	$2 \cdot 10^{-5}$	0.0002	$1 \cdot 10^{-5}$	0.0002	/IAEA 94/	/IAEA 94/
Cm	$2 \cdot 10^{-5}$	0.0002	$1 \cdot 10^{-5}$	0.0002	wie Am/	wie Am

## 6.7 Pfad: Berechnungsfeldbau

### 6.7.1 Parameterwerte für die Berechnung der direkten Kontamination der Pflanzenblätter nach Formel 5.7.1

In die Berechnung gehen die folgende Größen ein, die in den nächsten Abschnitten näher erläutert werden:

- Berechnungsrate  $W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  während der Berechnungszeit in  $l/m^2 \text{ s}$
- Zeit  $t_w^{\text{Klima,Pflanze}}$ , in der die Pflanze der Beregnung ausgesetzt ist, in s
- oberirdischer Pflanzenertrag  $y_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  bezogen auf Frischsubstanz in  $kg/m^2$
- Rückhaltung auf den Blättern  $f_w^{\text{Pflanze}}$ , dimensionslos
- biologische Verweilkonstante  $\lambda_{v,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  auf den Blättern in s
- Zeit  $t_v^{\text{Klima,Pflanze}}$  zwischen Ernte und Verzehr in s

Alle diese Größen sind pflanzen- und klimaspezifisch.

#### 6.7.1.1 Berechnungsrate $W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$

Die Berechnungsrate wird aus der gesamten jährlichen Beregnungsmenge und der Dauer der Beregnungsperiode berechnet. Als Beregnungsperiode wird die Zeit angesetzt, in der 90 % der gesamten Beregnung erfolgt. Die in Abschnitt 4 abgeleiteten klimaspezifischen Beregnungsmengen und Perioden werden in Tabelle 6.10 zusammengefasst. Die ermittelten Beregnungsraten sind Mittelwerte über alle zum Verzehr durch den Menschen angebauten Pflanzen. Eine Differenzierung nach Pflanzenarten erfolgt nicht.

Bei Pflanzen, die dem Vieh als Futter dienen, darf sich die mittlere Beregnungsrate nicht auf die tatsächliche Beregnungsperiode beziehen, sondern auf die gesamte Weidezeit, denn die Tiere erhalten entweder Weidefutter oder Lagerfutter, wobei nicht danach differenziert wird, ob es nun beregnet wurde oder nicht. Daher gilt Tabelle 6.10 nicht für Weiden.

Die Beregnung von landwirtschaftlichen Nutzflächen verfolgt noch weitere Ziele als nur den Ausgleich eines Feuchtigkeitsmangels oder die Prävention gegen Nachtfröste. In früheren Zeiten wurde häufig auch beregnet, um dem Boden Dünger zuzuführen /HÜB 95/. Ein großer Nachteil dieser Methode ist die Erosionsgefährdung, da insbesondere auf abschüssigen Flächen viel Erdreich abgeschwemmt wird.

**Tab. 6.10** Jährlicher Beregnungsbedarf und Beregnungsperiode für Freilandpflanzen

Klima	Jahresbedarf in l/m <sup>2</sup>	Beregnungsdauer in Tagen	Beregnungsrate in l/(m <sup>2</sup> s)
Feuchtwinterkaltes Klima Df III Süden	100	110	1.1 · 10 <sup>-5</sup>
Wintertrockenes Klima Dw I, II Norden	60	30	2.3 · 10 <sup>-5</sup>
Dw III Süden	200	90	2.6 · 10 <sup>-5</sup>
Feuchtgemäßigtes Klima Cf I „Edinburgh“	80	120	7.7 · 10 <sup>-6</sup>
Cf II „Hannover“	110	120	1.2 · 10 <sup>-5</sup>
Cf III „Prag“	130	130	1.2 · 10 <sup>-5</sup>
Cf IV „Paris“	160	120	1.5 · 10 <sup>-5</sup>
Etesienklima Es I „Mailand“	190	120	1.8 · 10 <sup>-5</sup>
Es II „Rom“	380	110	4.0 · 10 <sup>-5</sup>

#### 6.7.1.2 Zeit $t_w^{\text{Klima,Pflanze}}$ , in der die Pflanze der Beregnung ausgesetzt ist

Der Wert dieses Parameters hat keinen großen Einfluss auf die berechnete Höhe der Strahlenexposition, vorausgesetzt, die Zeit beträgt mindestens einige Wochen. Daher wird sie nur geschätzt, siehe Tabelle 6.11.

Die Wachstumsgeschwindigkeit der Pflanzen steht in Beziehung zur Tagesmitteltemperatur, zur Helligkeit und zur Wasserversorgung. Letztere wird durch die Beregnung optimiert und wirkt daher nicht begrenzend. Hinsichtlich des Bedürfnisses nach Helligkeit ist zu beachten, dass der Standort immer auf dem gleichen Breitengrad liegen wird, während die analogen Klimaverhältnisse heute in höheren oder niedrigeren Breiten auftreten. Daher können die Erfahrungen aus heutigen analogen Klimagebieten nicht ungeprüft übertragen werden. In keinem Fall ist die Zeit, in der die Pflanzen der Beregnung ausgesetzt sind, länger als die Zeit zwischen dem Beginn der Beregnung und der Ernte bzw. zwischen zwei Weidegängen.

**Tab. 6.11** Zeit, in der die Pflanzen beregnet werden, in s

Klima	Weidebewuchs	Blattgemüse	Andere Pflanzen
Feuchtwinterkaltes Klima Df III Süden	$2.5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$
Wintertrockenes Klima Dw I, II Norden Dw III Süden	$2.5 \cdot 10^6$ $2.5 \cdot 10^6$	entfällt $8 \cdot 10^6$	entfällt $8 \cdot 10^6$
Feuchtgemäßigtes Klima Cf I „Edinburgh“ Cf II „Hannover“ Cf III „Prag“ Cf IV „Paris“	$2.5 \cdot 10^6$ $2.5 \cdot 10^6$ $2.5 \cdot 10^6$ $2.5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^6$ $4 \cdot 10^6$ $4 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^6$
Etesienklima Es I „Mailand“ Es II „Rom“	$2 \cdot 10^6$ $2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$ $4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^6$

### 6.7.1.3 Bewuchsdichte

In Abschnitt 4 wurden Angaben gemacht über den jährlichen Ertrag der zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile. Dieser ist nicht identisch mit der auf dem Felde bzw. der Weide stehenden Pflanzenmasse. So wachsen Kartoffelknollen unterirdisch und tragen nicht zum oberirdischen Ertrag bei, Getreide wird beregnet, während es noch grün ist und eine höhere Blattmasse hat als zur Erntezeit. Weidebewuchs wird mehrfach im Jahr geerntet oder abgeweidet und auch viele Gemüsesorten werden im feuchtgemäßigten Klima und besonders im Etesienklima zweimal und öfter reif. Die für die verschiedenen Klimabedingungen gewählten oberirdischen Erträge gehen aus Tabelle 6. 12 hervor. Unter der stillschweigenden Annahme, dass die Radionuklidkonzentration in den Blättern und den anderen zum Verzehr bestimmten Pflanzenteilen gleich ist, können die Werte in Tabelle 6.12 verwendet werden, wenn die externe Kontamination der Pflanzen nach Gleichung 5.7.1 berechnet wird.

**Tab. 6.12** Oberirdische Erträge verschiedener Freilandpflanzen in kg/m<sup>2</sup>

Klima	Weidebewuchs	Blattgemüse	Getreide	Wurzelgemüse	Obst, Fruchtgemüse
Feuchtwinterkaltes Klima Df	0.6	1.6	2	2	2
Wintertrockenes Klima Dw I, II Norden	0.3	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Dw III Süden	0.6	1.6	2	2	2
Feuchtgemäßigtes Klima Df	0.85	1.6	2.4	2.4	2.4
Etesienklima Es	0.85	1.6	2	2.4	4

Abweichend hiervon beträgt die Bewuchsdichte des Lagerfutters im feuchtwinterkalten Klima und im wintertrockenen Klima 0.75 kg/m<sup>2</sup>, weil es erst am Ende der Wachstumsperiode geerntet wird; die Kühe grasen jedoch auch vorher, wenn der Aufwuchs noch nicht so hoch ist.

## 6.7.2 Rückhaltung durch die Blätter

Der Anteil der bei Beregnung auf der Pflanze abgelagerten Radioaktivität beträgt nach /BMU 01/  $f_w^{\text{Pflanze}} = 0.3$ . Dieser Wert bezieht sich auf die gesamte oberirdische Pflanzenmasse (siehe Tabelle 6.10). Die anderswo, z. B. in /SIM 95/ angegebenen Werte für die abgelagerte Radioaktivität sind nur bei Blattpflanzen vergleichbar, aber nicht für Früchte, Kartoffeln oder Getreidekörner, da sie dort auf das Erntegut bezogen werden.

### 6.7.2.1 Biologische Verweilkonstante auf den Blättern

Nach /BMU 01/ beträgt die biologische Verweilkonstante  $5.7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ . Dieser Wert steht mit dem Klima in Beziehung. Zwei verschiedene Vorgänge tragen zur Höhe der biologischen Verweilkonstanten bei:

- Die Pflanzen wachsen; daher nimmt die Konzentration der einmal auf die Blätter aufgetragenen Radioaktivität mit der Zeit durch Verdünnung ab. Die Geschwindigkeit des Wachstums wird nicht nur durch das Klima beeinflusst, sondern auch durch den physiologischen Zustand der Pflanze. Kurz vor der Ernte ist die Wachstumsgeschwindigkeit der Blätter viel geringer als im Frühling, die Halbwertszeit für



die Abnahme der Radioaktivitätskonzentration entsprechend höher. Regelmäßig abgeweideter Weidebewuchs wächst dagegen am schnellsten bei hoher Temperatur und guter Wasserversorgung.

- Durch Niederschläge und Beregnung werden radioaktive Teilchen, die nicht bereits ins Innere der Blätter aufgenommen wurden, von den Blattoberflächen abgewaschen. Auf behaarten und wolligen Blättern ist die Halbwertszeit höher als auf glatten Blättern, auf absterbenden glatten Blättern ist sie am kürzesten.

Auf Grund des vereinfachten Modells für die externe Kontamination der Pflanzen (Gleichung 5.7.1) sollen diese Einflussfaktoren vernachlässigt werden; die Verweilkonstante beträgt einheitlich  $\lambda_v = 5.7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

### 6.7.2.2 Zeit $t_v^{\text{Klima,Pflanze}}$ zwischen Ernte und Verzehr

Während sich die Ernte der Pflanzen auf wenige Monate des Jahres konzentriert, erfolgt der Verzehr fortlaufend während des gesamten Jahres. Die Verfügbarkeit von frisch geernteten Pflanzen ist pflanzen- und klimaspezifisch. In Anbetracht der Langlebigkeit der meisten aus einem Endlager freigesetzten Stoffe kommt diesem Parameter keine hohe Bedeutung zu. Daher erscheint es gerechtfertigt, von pauschalen Schätzwerten auszugehen, siehe Tabelle 6.13.

**Tab. 6.13** Zeit zwischen Ernte und Verzehr bei verschiedener Freilandpflanzen in s

Klima	Blattgemüse	Getreide	Wurzelgemüse	Obst, Fruchtgemüse
Feuchtwinterkaltes Klima Df III (Süden)	0	$1.3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Wintertrockenes Klima Dw III (Süden)	0	$1.3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Feuchtgemäßigtes Klima Cf	0	$1 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
Etesienklima Es	0	$1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$

### 6.7.3 Interne Radionuklidkonzentration in den essbaren Pflanzenteilen nach Transport von der Blattoberfläche

Die Anwendung der Formeln 5.7.2 und 5.7.3 erfordert die Kenntnis folgender Parameterwerte, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden:

- Berechnungsmenge  $B_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$  bei der letzten Berechnung vor der Ernte in  $\text{l/m}^2$
- Zeit  $t_b^{\text{Klima,Pflanze}}$  zwischen der letzten Berechnung und der Ernte in s
- Ertrag  $y_{\text{Pflanzenorgan}}^{\text{Klima}}$  des zum Verzehr bestimmten Pflanzenorgans
- Anteil  $f_r^{\text{abs}}$  der auf die äußeren Pflanzenteile abgelagerten Aktivität des Radionuklids  $r$ , der in die Blätter hinein gelangt
- Translokation  $f_{r,\text{Pflanze}}^{\text{trans}}$  in die zum Verzehr dienenden Pflanzenteile.

Dabei sind die beiden zuletzt genannten Parameter radionuklid- und pflanzenspezifisch, während der Ertrag und die Zeit zwischen der letzten Berechnung und der Ernte pflanzen- und klimaspezifisch sind.

#### 6.7.3.1 Berechnungsmenge bei der letzten Berechnung vor der Ernte

Unter allen Klimabedingungen beträgt die einzelne Berechnungsgabe entsprechend den Empfehlungen in /RUH 85/ für alle Kulturen  $25 \text{ l/m}^2$ , nur im Etesienklima werden  $30 \text{ l/m}^2$  am Tag gegeben.

#### 6.7.3.2 Zeit zwischen der letzten Berechnung und der Ernte in s

Nach /RUH 85/ wird empfohlen, die Beregnung von Getreide bald nach dem Ährenschieben einzustellen, Kartoffeln bis etwa eine Woche vor der Ernte zu beregnen, die meisten Gemüse- und Obstsorten dagegen bis zur Ernte feucht zu halten. Aus der Kombination dieser Angaben mit den gesamten Beregnungsmengen (siehe Tabelle 6.10), den hauptsächlichsten Beregnungszeiten (im Frühling) und den Erntezeiten (im Sommer) ergeben sich die in Tabelle 6.14 aufgelisteten geschätzten Abstände zwi-

schen der letzten Berechnung und der Ernte. Bei diesen Zahlen wird berücksichtigt, dass auch Ernten eingebracht werden, die niemals berechnet wurden.

**Tab. 6.14** Zeit zwischen der letzten Berechnung und der Ernte verschiedener Freilandpflanzen in s

Klima	Weidebewuchs	Blattgemüse	Getreide	Wurzelgemüse	Obst, Fruchtgemüse
Feuchtwinterkaltes Klima Df III Süden	$1.3 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$
Wintertrockenes Klima Dw I, II Norden Dw III Süden	$5 \cdot 10^5$ $6 \cdot 10^5$	entfällt $9 \cdot 10^5$	entfällt $2.4 \cdot 10^6$	entfällt $6 \cdot 10^5$	entfällt $6 \cdot 10^5$
Feuchtgemäßigtes Klima Cf I „Edinburgh“ Cf II „Hannover“ Cf III „Prag“ Cf IV „Paris“	$1.9 \cdot 10^6$ $1.6 \cdot 10^6$ $1.3 \cdot 10^6$ $1.3 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^6$ $1.2 \cdot 10^6$ $8 \cdot 10^5$ $7 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^6$ $2.4 \cdot 10^6$ $2.4 \cdot 10^6$ $2.4 \cdot 10^6$	$1.9 \cdot 10^6$ $1.2 \cdot 10^6$ $9 \cdot 10^5$ $7 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^6$ $1.2 \cdot 10^6$ $9 \cdot 10^5$ $7 \cdot 10^5$
Etesienklima Es I „Mailand“ Es II „Rom“	$1.7 \cdot 10^6$ $1.2 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^5$	entfällt entfällt	$6 \cdot 10^5$ $6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$

### 6.7.3.3 Ertrag der zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile

Die Zahlen in Abschnitt 4 ermittelten Zahlen werden in Tabelle 6.15 zusammengefasst.

**Tab. 6.15** Ertrag der zum Verzehr bestimmten Freilandpflanzen in kg/m<sup>2</sup> je Ernte

Klima	Weidebewuchs	Blattgemüse	Getreide	Wurzelgemüse	Obst, Fruchtgemüse
Feuchtwinterkaltes Klima Df III Süden	0.6	1.6	0.4	3.5	0.5
Wintertrockenes Klima Dw I, II Norden III Süden	0.3 0.6	entfällt 1.6	entfällt 0.4	entfällt 3.5	entfällt 0.5
Feuchtgemäßigtes Klima Cf	0.85	1.6	0.5	3.5	2
Etesienklima Es	0.85	1.6	0.25	2	3

#### 6.7.3.4 Absorbierter Anteil der auf die Pflanzen abgelagerten Aktivität

Der Anteil  $f_r^{abs}$ , der in die Blätter aufgenommen wird, sollte radionuklidspezifisch sein, aber nicht vom Klima abhängen. Eine Abhängigkeit vom Habitus der Pflanzen muss bestehen: Geschlossene Kohlköpfe werden wesentlich weniger Radionuklide absorbieren können als etwa die Blätter von Spinat und Feldsalat. In Ermangelung besserer Informationen wird für alle Radionuklide und alle Pflanzen  $f_r^{abs} = 0.5$  gesetzt. Dieser Wert ist vorläufig und unbestätigt.

#### 6.7.3.5 Translokation in die zum Verzehr dienenden Pflanzenteile

Das Ausmaß der Translokation hängt nicht vom Klima ab, sondern vom Radionuklid und vom zum Verzehr bestimmten Pflanzenteil. Bezüglich der Höhe sind bisher nur Anhaltspunkte bekannt. So charakterisiert /SIM 95/ die Radionuklide als mobil, semi-mobil oder immobil. In /IAEA 94/ wird die Translokation in der Einheit

$$\frac{\text{Bq/kg meßbaren Organ}}{\text{Bq/m}^2 \text{ auf der Blattoberfläche zurückgehaltene Radioaktivität}}$$

angegeben. Diese Einheit bezieht sich auf die zurückgehaltene Radioaktivität, nicht auf die absorbierte Aktivität, wie hier vorgeschlagen wird. Die Höhe der Translokation ist wesentlich abhängig vom Entwicklungszustand der Pflanze bei der Berechnung. Sie ist also für jedes Berechnungsereignis unterschiedlich. Bei Getreide sind die höchsten Werte nach /IAEA 94/ normalerweise bei einer Berechnung etwa drei Wochen vor der Ernte anzutreffen, aber auch dies ist radionuklidabhängig.

Unter Berücksichtigung der unterstellten Absorption in die Blätter in Höhe von 50 % und eines Trockensubstanzgehaltes von 85 % ergeben sich als Durchschnittswerte für Getreide die in Tabelle 6.16 angegebenen Faktoren. Diese Zahlen beruhen nach /IAEA 94/ teilweise auf wenig zuverlässigen Messwerten und wurden unter der Annahme berechnet, dass die Abstände zwischen zwei Berechnungsereignissen über die ganze Wachstumszeit bis vier Wochen vor der Ernte gleich bleiben. Daher sind sie für die verschiedenen Klimagebiete unterschiedlich. Die Tabelle zeigt, dass die Unterschiede verglichen mit der inhärenten Unsicherheit geringfügig sind und vernachlässigt werden können. Dass die Translokationsfaktoren im Etesienklima am höchsten

sind, beruht auf der höheren Frequenz der Beregnungsereignisse; dort wird während der sensiblen Phasen häufiger beregnet.

**Tab. 6.16** Translokationsfaktoren für Getreide, berechnet aus Angaben in /IAEA 94/

Klima	Feuchtwinterkaltes Klima Df	Wintertrockenes Klima Dw	Feuchtgemäßigtes Klima				Etesienklima	
			Cf				Es	
Element	III Süden	III Süden	I „Edinburgh“	II „Hannover“	III „Prag“	IV „Paris“	I „Mailand“	II „Rom“
Cr	0.009	0.012	0.01	0.012	0.016	0.016	0.017	0.017
Mn	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
Fe	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
Co	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04
Zn	0.15	0.16	0.12	0.16	0.17	0.21	0.22	0.23
Sr	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03
Ru	0.014	0.011	0.016	0.014	0.017	0.014	0.016	0.014
Cs	0.16	0.15	0.15	0.17	0.17	0.2	0.21	0.21
Ba	0.016	0.013	0.019	0.017	0.019	0.016	0.018	0.016
Ce	0.012	0.011	0.014	0.013	0.015	0.014	0.015	0.014
Pb	0.007	0.01	0.008	0.009	0.015	0.012	0.014	0.014

Die in Tabelle 6.16 angegebenen Translokationsfaktoren sind Hilfsgrößen, die in die Berechnung der Strahlenexposition nicht eingehen, sondern sie bilden zusammen mit der Klassifizierung der Radionuklide als mobil, semimobil oder immobil nach /SIM 95/, siehe Tabelle 6.17, die Grundlage für eine pauschale Abschätzung.

**Tab. 6.17** Klassifizierung der Translokationsfaktoren nach /SIM 95/

Element	Translokation	Element	Translokation	Element	Translokation
Cr	immobil	Zr	semimobil	Ce	immobil
Mn	semimobil	Nb	semimobil	Eu	immobil
Fe	semimobil	Mo	semimobil	Np	immobil
Co	semimobil	Tc	mobil	Pu	immobil
Zn	semimobil	Ru	immobil	Am	immobil
Rb	mobil	I	mobil	Cm	immobil
Sr	semimobil	Cs	mobil		
Y	semimobil	Ba	semimobil		

Aus dem Vergleich der Tabellen 6.16 und 6.17 werden die Translokationsfaktoren für weitere Radionuklide, siehe Tabelle 6.18, erschlossen.

**Tab. 6.18** Translokationsfaktoren  $f_{r,Pflanze}^{trans}$  in Bq/kg (FM) : Bq/m<sup>2</sup> (absorbiert)

Element	$f_{r,Weidebewuchs}^{trans}$	$f_{r,Blattgemüses}^{trans}$	$f_{r,Getreide}^{trans}$	$f_{r,Wurzelgemüse}^{trans}$	$f_{r,Obst}^{trans}$
C					
Cl	1		0.2	0.002	0.02
Ca	1		0.05	0.0005	0.005
Co	1		0.05	0.0005	0.005
Ni	1		0.05	0.0005	0.005
Se	1		0.2	0.002	0.02
Rb	1		0.2	0.002	0.02
Sr	1		0.05	0.0005	0.005
Zr	1		0.02	0.0002	0.002
Nb	1		0.02	0.0002	0.002
Mo	1		0.05	0.0005	0.005
Tc	1		0.2	0.002	0.02
Pd	1		0.05	0.0005	0.005
Sn	1		0.2	0.002	0.02
I	1		0.2	0.002	0.02
Cs	1		0.2	0.002	0.02
Sm	1		0.02	0.0002	0.002
Eu	1		0.02	0.0002	0.002
Pb	1		0.02	0.0002	0.002
Po	1		0.02	0.0002	0.002
Ra	1		0.05	0.0005	0.005
Ac	1		0.02	0.0002	0.002
Th	1		0.02	0.0002	0.002
Pa	1		0.02	0.0002	0.002
U	1		0.02	0.0002	0.002
Np	1		0.02	0.0002	0.002
Pu	1		0.02	0.0002	0.002
Am	1		0.02	0.0002	0.002
Cm	1		0.02	0.0002	0.002

In Tabelle 6.18 wird von einem Translokationsfaktor von 0.2 Bq/kg Getreide : Bq/m<sup>2</sup> absorbierte Radionuklide für die mobilen Elementen Caesium und Zink ausgegangen. Für semimobile Elemente ergibt sich der Translokationsfaktor zu etwa 0.05 und für immobile Elemente zu knapp 0.02 Bq/kg Getreide : Bq/m<sup>2</sup> absorbierte Radionuklide.

Translokationsfaktoren für Früchte werden auf Grund des geringeren Trockensubstanzanteils zu jeweils 10 % hiervon festgesetzt. Im Fall von Wurzelgemüse und Kartoffeln führt eine Berechnung während der Blütezeit aus pflanzenanatomischen Gründen nicht zu einer drastischen Erhöhung der Translokation. Die Translokationsfaktoren sollen daher 1 % von denen für Getreide betragen. Für Blätter (Blattgemüse und Weidebewuchs) wird als Translokationsfaktor für alle Radionuklide  $1 \text{ Bq/kg} : \text{Bq/m}^2$  absorbierte Radionuklide angesetzt. Es sei darauf hingewiesen, dass alle Zahlen in Tabelle 6.18 vorläufige Rechengrößen darstellen, die der Revision bedürfen.

#### 6.7.4 Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden über die Wurzel

##### 6.7.4.1 Parameterwerte für die Berechnung des Transports aus dem Boden in die essbaren Pflanzenteile

Folgende Angaben werden benötigt:

- Die Radionuklidkonzentration im Boden
- Die Transferfaktoren zur Beschreibung des Verhältnisses zwischen der Radionuklidkonzentration in der Pflanze und im Boden.

Unter Langzeitbedingungen kommt dem Boden als Reservoir für radioaktive Stoffe besondere Bedeutung zu. Nun üben die Eigenschaften der Böden einen starken Einfluss auf die Radionuklidkonzentration im Boden aus, so dass den klimatypischen Besonderheiten der Bodeneigenschaften und ihren Folgen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss.

##### 6.7.4.2 Radionuklidkonzentration im Boden

Die Radionuklidkonzentration im Boden  $C_{r,Klima}^m$  wird gemäß Formel 6.1 berechnet.

Folgende Größen müssen bekannt sein:

- Berechnungsrate  $W_{Pflanze}^{Klima}$
- Dauer der Berechnungsperiode  $t_R^{Pflanze,Klima}$

- Zeit  $t_b$ , die für die Anreicherung zur Verfügung steht.
- Flächentrockenmasse des für Pflanzenwurzeln zugänglichen Bodens  $p_m^{\text{Klima}}$ , in dem sich die Radionuklide anreichern
- Die radionuklid- und klimaspezifischen Abbaukonstanten  $\lambda_{\text{eff},r}^{\text{Klima}}$  für die Verlagerung der Radionuklide aus dieser Bodenschicht heraus

$$C_{r,\text{Klima}}^m = \frac{C_r^{\text{BW}} \cdot W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}} \cdot t_R^{\text{Pflanze,Klima}}}{p_m^{\text{Klima}} \cdot \lambda_{\text{eff},r}^{\text{Klima}} \cdot 365.25} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\text{eff},r}^{\text{Klima}} \cdot t_b}\right) \quad (6.1)$$

Beregnungsrate und Dauer der Beregnungsperiode sind schon aus Tabelle 6.10 bekannt. Die Zeit, die für die Anreicherung zur Verfügung steht, ist identisch mit der Zeit, in der am Standort ein Brunnen betrieben wird, dessen Wasser zur Beregnung eingesetzt wird. Wenn unterstellt wird, dass der Standort immer besiedelt sein wird, wird diese Zeit nur durch die Dauer der Freisetzung mit konstanter Rate, über die in diesem Bericht keine Aussage gemacht werden kann, begrenzt. Unter diesen Umständen wird empfohlen, die Anreicherungszeit  $t_b$  als unendlich zu betrachten.

#### 6.7.4.3 Flächentrockenmasse des für Pflanzenwurzeln zugänglichen Bodens

Die Flächentrockenmasse  $p_m^{\text{Klima}}$  wird berechnet aus der Stärke der relevanten Bodenschicht  $d_m^{\text{Klima}}$ , der Gesamtporosität  $\varepsilon_{t,m}^{\text{Klima}}$  und der Lagerungsdichte der mineralischen Bodenpartikel  $\rho_{\text{Boden}}$ , siehe Formel 6.2.

$$p_m^{\text{Klima}} = (1 - \varepsilon_{t,m}^{\text{Klima}}) \cdot \rho_{\text{Boden}} \cdot d_m^{\text{Klima}} \quad (6.2)$$

Die Lagerungsdichte der mineralischen Bodenpartikel  $\rho_{\text{Boden}}$  liegt allgemein zwischen 2600 und 2700 kg/m<sup>3</sup> /WIL 95/, hier wird konstant von 2650 kg/m<sup>3</sup> ausgegangen. Die anderen Variablen sind klima- und bewuchsabhängig. Hinsichtlich des Pflanzenbewuchses wird nur nach Weidebewuchs und anderen Pflanzen unterschieden.



Die Mächtigkeit der den Pflanzen zugänglichen Bodenschicht  $d_m^{\text{Klima}}$  hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab: Wenn der Mindestbedarf der Pflanzen nicht gedeckt wird, gedeihen sie nicht. Die Mächtigkeit des Bodens, in dem die Radionuklide mit der Zeit homogen verteilt werden, hängt nicht nur von der Bearbeitungstiefe durch den Menschen ab, sondern auch von der natürlichen Entwicklung in geologischen Zeiträumen, die in enger Beziehung zum Klima steht.

Eckwerte für den Bedarf der Pflanzen werden in Tabelle 6.19 angegeben. Der durchwurzelbare Boden ist dabei weder mit dem Boden in Pflugschartiefe noch mit dem A-Horizont identisch. Zum Beispiel wird das Pflanzenwachstum durch Stauwasser gehemmt, aber Felsspalten sind durchwurzelbar.

**Tab. 6.19** Mindestbedarf der Pflanzen an Bodentiefe in m

Weidebewuchs	0.05
Krautige Pflanzen	0.1
Bäume	1

Aus der durchwurzelten Schicht nehmen die Pflanzen Radionuklide auf. Weitere Bodenschichten müssen jedoch betrachtet werden, wenn ein Stoffaustausch zwischen diesen Bodenschichten erfolgt. Die Analyse der Bodenhorizonte liefert einen Anhaltspunkt über die Tiefe, bis zu der ein regelmäßiger Stoffaustausch zwischen den Bodenschichten stattfindet. Sprünge in den Bodeneigenschaften zeigen an, dass der Stoffaustausch von der darunter liegenden Bodenschicht in die darüber liegende Schicht gehemmt ist, während der Transport von oben nach unten ungestört erfolgen kann. In diesen Fällen wirken die tiefer gelegenen Bodenschichten als Senke.

Der Zustand des Bodens ist nicht zeitlich konstant, sondern der Boden entwickelt sich fort. Die Entstehung der heute in Nord- und Mitteleuropa vorhandenen Böden hat erst nach der Eiszeit eingesetzt, da während der Eiszeit die vorher bestehenden Böden zerstört worden waren /HEN 97/. Neben dem Ausgangsgestein und dem Landschaftsrelief wirken auch das Klima, die Vegetation und die Tierwelt sowie die Bearbeitung durch den Menschen auf die Bildung des Bodens ein. Selbst in der vergleichsweise kurzen Zeitspanne seit dem Ende der Eiszeit haben sich viele dieser Einflussfaktoren mehrfach verändert: Es wurde wärmer und kälter, trockener und feuchter, das Wasser veränderte das Landschaftsrelief, und vor wenigen Jahrtausenden fing der Mensch

an, den Boden zu bearbeiten, wobei die Methoden in den letzten Jahrhunderten immer effizienter wurden. Daher entsprechen die heute real vorhandenen Böden meistens nicht den Böden, die langfristig unter den bestehenden Randbedingungen zu erwarten wären. Es ist vielmehr umgekehrt so, dass die heute vorhandenen Böden Zusatzinformationen über die vor der Einflussnahme des Menschen vorherrschende Vegetation liefern /WAL 70/.

#### **6.7.4.4 Die relevante Bodenschicht und die Gesamtporosität**

Eine Beregnung des Freilandes in der Tundra ist nicht zu erwarten; daher brauchen die Bodeneigenschaften der Tundra nicht ermittelt zu werden. Wenn es wärmer wird, kann zwar eine kurze Zeit lang schon Beregnungsfeldbau betrieben werden, während der Boden noch Charakteristika der kälteren Zeiten aufweist, doch solche Phasen des Übergangs zwischen zwei Klimabedingungen sollen hier nicht analysiert werden. Daher werden die Bodeneigenschaften der Tundra nicht dargestellt.

#### **Feuchtwinterkaltes Klima (Df)**

Unter feuchtwinterkalten Klimabedingungen sind insbesondere Moorböden und Podsolböden weit verbreitet. Moorböden werden dabei mit Sicherheit nicht beregnet, da sie von Natur aus nass sind und erst nach Entwässerung für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet werden. Sie brauchen daher hier nicht berücksichtigt zu werden.

Podsolböden entstehen, wenn folgende Randbedingungen zusammentreffen: niedrige Jahresmitteltemperaturen, relativ hohe Niederschläge, Vegetation, die bei ihrer Zersetzung stickstoffarme saure und aggressive Huminstoffe, insbesondere Fulvosäuren, produziert. Solch eine Vegetation ist z. B. die für das boreale Waldgebiet charakteristische Flora aus Nadelbäumen und Zwergsträuchern. Ein besonders günstiges Ausgangsmaterial bilden Sande und Kiese /HEN 97/.

Die Niederschläge werden durch die sich zersetzende Vegetation angesäuert und sind dadurch geeignet, Kationen wie Kalium, Natrium, Kalzium und Magnesium auszuwaschen. Durch den Verlust dieser Kationen wird der Boden noch stärker sauer, wodurch nun auch die Kationen Eisen, Aluminium und Silizium in Lösung gehen und ausgewaschen werden. So entsteht unter der 5 bis 10 cm starken Auflageschicht

(L, Of, Oh), in der die Zersetzung der Streu stattfindet, und der dünnen Humusschicht (Ah) der lebensfeindliche Aschhorizont (Ae). Dieser Horizont ist optisch erkennbar an seiner hellen ausgebleichten Farbe; er reagiert stark sauer, wird daher kaum oder nicht von Regenwürmern besiedelt und verfügt nur über ein geringes Porenvolumen /MAK 91/. In tieferen Bodenschichten reagiert der Boden zunehmend basischer, was dazu führt, dass dort die Eisen- und Aluminiumoxide wieder ausgefällt werden (Humushüllenhorizont (Bh) und Rosthüllenhorizont (Bs)) /HEN 97/.

Diese Bodenschichtung hat eine Konsequenz für die Durchwurzelung: Der Aschhorizont wird zwar von der Pfahlwurzel der Bäume durchquert, aber die für die Aufnahme von Mineralen und Wasser bedeutenden Seitenwurzeln bilden sich nur in den Schichten darüber und darunter aus.

In regelmäßig bearbeiteten Böden stellt sich diese Schichtung nicht ein. Hier fehlen der Auflagehorizont aus Streuschicht (L), der Fermentationshorizont (Of) und der Humushorizont (Oh), wenn er nicht vorsätzlich aufgebracht wird, z. B. durch Düngung mit Plaggen oder Kompost. Die darunter liegenden Horizonte werden normalerweise nicht vom Pflug erreicht. Daher wird davon ausgegangen, dass ein beackertes Podsolboden unter den Bedingungen des feuchtwinterkalten Klimas 20 cm stark ist; das ist gleichzeitig der Wert der AVV /BMU 01/.

Ein Podsolboden, auf dem Weiden kultiviert werden und der nicht regelmäßig umgebrochen wird, bietet den Graswurzeln nur den Auflagehorizont und die Rohhumusschicht. Auf Grund der Azidität des Unterbodens ist mit einer Durchmischung durch Bodenlebewesen nicht zu rechnen /MAK 94/; die Stärke des Bodens beträgt folglich nur etwa 10 cm. Auch dies ist der Wert der AVV /BMU 01/.

Da der Boden auf Grund der Tonverlagerung wasserdurchlässig geworden ist, neigt er zur Austrocknung. Er muss daher beregnet werden, wenn die natürlichen Niederschläge kurze Zeit ausbleiben. Kurze Trockenperioden sind auch in regenreichen Gebieten normal. Nach /HEN 97/ ist mit einer mittleren Porosität von 0.45 in den obersten 10 cm und von 0.4 in den obersten 20 cm des Bodens zu rechnen.

### **Kaltwintertrockenes Klima (Dw)**

Vorherrschender Boden ist auch hier der Podsol /HEN 97/.

## Feuchtgemäßigtes Klima (Cf)

Hier ist im Binnenland insbesondere mit Podsolböden, Fahlerden, Braun- und Schwarzerden zu rechnen. In ozeanischen Lagen (z. B.: „Paris“) herrschen Moorböden und Braunerden vor, bei niedrigen Temperaturen (z. B. „Edinburgh“ und „Hannover“) bilden sich vorwiegend Podsole und Fahlerden, in kontinentaleren Lagen (z. B. „Prag“) herrschen Tschernoseme und Wiesenböden vor /MÜL 81, HEN 97/. Talbildung ist auf Grund der hohen Niederschläge ein häufig beobachtetes Phänomen; in den Tälern wird verbreitet Pseudogley und Auenlehm angetroffen /MÜL 81/, in den Hanglagen Rendzinen, die ähnlichen Pararendzinen treten vorzugsweise über Löss auf /HEN 97/.

Fahlerden sind mit Podsolerden verwandt. Sie entstehen bei einer weniger starken Bewaldung mit Nadelwald und sind daher nicht so stark sauer. Wegen der höheren Temperaturen ist hier das Bodenleben intensiver, der Humusgehalt geringer und das Porenvolumen in den oberen Bodenschichten höher. Der Unterboden ist tonreich und porenarm. Als relevante Bodenschicht können auch hier 0.1 m unter Weiden und 0.2 m unter Äckern angesetzt werden. Die Porosität betrage daher 0.55 unter Weiden und 0.45 unter Äckern /HEN 97/.

Braunerden (Cambisole) können auf unterschiedlichen Ausgangsmaterialien entstehen, auf sandigen pleistozänen Lockersedimenten des Tieflandes ebenso wie auf kalkhaltigen und kalziumsilikatreichen Gesteinen. Ihre Eigenschaften unterscheiden sich jedoch nach dem Ausgangsgestein. So gehören Braunerden über kalkreichem Untergrund zu den besten Ackerböden, während Braunerden über Sandsteinen und basenarmen Schiefen selbst bei guter Düngung wenig fruchtbar sind /HEN 97/.

Eine Profildifferenzierung wie in Podsolböden erfolgt nicht, da Braunerden immer einen Tongehalt in Höhe von 20 bis 30 % aufweisen, der die Auswaschung bremst; die leichter löslichen Alkali- und Erdalkali-Ionen werden noch ausgewaschen, während schwerer lösliche dreiwertige Ionen an Ort und Stelle bleiben und die braune Farbe bedingen. Im Ergebnis bilden sich unter dem Mullhorizont ein oder zwei Braunhorizonte aus. Weil diese Böden nie so stark sauer sind wie Podsolböden, können Regenwürmer den Boden bis zum C-Horizont vermischen, wobei aber ein deutlicher Sprung im Humusgehalt /HEN 97/ anzeigt, dass die unteren Schichten nur wenig von Regen-

würmern besiedelt werden. Dies gilt insbesondere über Sandstein und anderem basenarmen Gestein, wie es in Norddeutschland vorliegt. Als Bodentiefe werden deshalb 30 cm angesetzt, als Porosität 0.45; beide Werte gelten sowohl für Weide- als auch für Ackerböden.

Rendzinen sind schwach entwickelte Böden geringer Bodentiefe, die sich aus kalkhaltigem Festgestein entwickelt haben. Ihre Humusschicht enthält 6 bis 8 % Kalkmull, die Reaktion ist meist schwach basisch, ihr Regenwurmbesatz hoch. Rendzinen sind Übergangsformen in der Entwicklung vom Rohboden zur Braunerde, während Pararendzinen auf dem Weg zu Podsolen und auch zu Schwarzerden auftreten. Wenn die Erosion stark ist, bleibt die Entwicklung auf der Stufe der Pararendzina stehen /HEN 97/. Als Bodenstärke können 10 cm unter Weiden und 30 cm unter Äckern angesetzt werden; die Differenzierung erfolgt nur, weil auf 10 cm starken Böden kein Ackerbau möglich ist. Die Porosität wird auf 50 % geschätzt.

Schwarzerden entwickeln sich bevorzugt über einem basenreichen Ausgangsmaterial, wenn im Sommer eine hohe Primärproduktion erfolgt, aber im Winter so niedrige Temperaturen herrschen, dass der Abbau verzögert wird. So bilden sich sehr starke humose Schichten mit optimalen Bedingungen für Regenwürmer, die für eine effektive Vermischung bis in 60 cm Tiefe sorgen; darunter nimmt der Humusgehalt sprunghaft ab /HEN 97/, was anzeigt, dass die Bodenluft in der Tiefe (vermutlich wegen des höheren CO<sub>2</sub>-Gehaltes) den Regenwürmern nicht sehr gut bekommt.

Basenreiches Ausgangsmaterial liegt derzeit am Standort nicht vor. Dennoch ist es möglich, dass es entsteht, wenn während und nach der nächsten Eiszeit günstige Bedingungen für die Bildung von Lössschichten herrschen. Löss wird mit dem Wind aus anderen Gegenden der Erde verfrachtet und von Tundrapflanzen aufgefangen und festgehalten.

Die heute in Mitteleuropa auftretenden Schwarzerden wurden während des Klimaoptimums vor ungefähr 5000 Jahren gebildet und sind daher schon degradiert /HEN 97/. Ihr Auftreten zeigt, dass der Boden nach 5000 Jahren noch nicht im Gleichgewicht mit dem Klima steht.

### **Etesienklima (Es)**

Charakteristisch sind braune und rote mediterrane Böden /MÜL 81/. Rote mediterrane Böden entwickeln sich über kalk- und eisenreichem Ausgangsgestein, während über silikatreichen, eisenarmen Ausgangsgesteinen, wie sie an den vorgesehenen Standorten vorherrschen, mit dem Auftreten brauner Böden zu rechnen ist /MÜL 81/. Der A-Horizont ist auf Grund des häufigen winterlichen Starkregens und der sommerlichen Trockenheit, während der oftmals keine Vegetation die Erosionsprozesse behindert, wenig entwickelt, er kann sogar ganz fehlen, während der B-Horizont mächtig ist /MÜL 81/. Die Böden sind relativ nährstoffarm, weitgehend entkalkt und reagieren infolgedessen schwach sauer /ROT 93/. Wenn das Klima zu trocken ist, ist kaum eine echte Bodenbildung durch Verwitterung möglich, oder die Erosionsprozesse sind stärker als die Boden bildenden Prozesse. Unter solchen Randbedingungen kann die Bodenschädigung so weit gehen, dass eine landwirtschaftliche Nutzung unmöglich wird /ROT 93/. Ein weiteres Problem bildet die Versalzung vieler toniger Alluvialböden in den Tälern. Die natürliche Neigung dieser Böden zur Versalzung wird durch die Jahrtausende dauernde Beregnung noch verstärkt; oberhalb eines Salzgehaltes von 0.65 % werden diese Böden unfruchtbar, so dass dem durch Spülung und Tiefpflügen entgegengewirkt werden muss /ROT 93/. Es wird davon ausgegangen, dass auch Weiden von Zeit zu Zeit tief gepflügt werden. Die Bodenmächtigkeit wird deshalb sowohl unter Weiden als auch unter Äckern zu 50 cm angenommen; die Porosität betrage 45 %.

Bei Vernachlässigung können die Böden soweit degradiert werden, dass sie nur noch 5 cm mächtig sind und nur noch als extensive Weide genutzt werden. Dann werden sie aber normalerweise nicht beregnet. Im gegenteiligen Falle werden sie sich mit der Zeit verändern, aber Veränderungen sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Innerhalb dieser Bodenschichten werden die Radionuklide durch die Bodenbearbeitung und die Tätigkeit der Bodenlebewesen umverteilt. Bei der Ernte werden zwar Radionuklide entnommen, aber bei der Düngung mit Kompost oder Klärschlamm werden sie wieder zugefügt. Weil diese Vorgänge langfristig zu einer Homogenisierung führen, werden sie durch die Annahme einer homogenen Bodenschicht berücksichtigt.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Tabelle 6.20 zusammengefasst.

**Tab. 6.20** Angenommene Stärke ( $d_m^{\text{Klima}}$ ) und Porosität ( $\varepsilon_{t,m}^{\text{Klima}}$ ) der relevanten Bodenschicht; berechnete Flächentrockenmasse  $p_m^{\text{Klima}}$

Klima	Unter Weidebewuchs			Unter Äckern		
	$d_m^{\text{Klima}}$ (m)	$\varepsilon_{t,m}^{\text{Klima}}$ (-)	$p_m^{\text{Klima}}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$d_m^{\text{Klima}}$ (m)	$\varepsilon_{t,m}^{\text{Klima}}$ (-)	$p_m^{\text{Klima}}$ (kg/m <sup>2</sup> )
Feuchtwinterkaltes Klima Df	0.1	0.45	150	0.2	0.4	320
Wintertrockenes Klima Dw	0.1	0.45	150	0.2	0.4	320
Feuchtgemäßigtes Klima Cf						
I „Edinburgh“	0.1	0.45	150	0.2	0.4	320
II „Hannover“	0.1	0.55	120	0.2	0.45	290
III „Prag“	0.6	0.5	800	0.6	0.5	800
IV „Paris“	0.3	0.45	440	0.3	0.45	440
Etesienklima Es						
I „Mailand“	0.5	0.45	730	0.5	0.45	730
II „Rom“	0.5	0.45	730	0.5	0.45	730

#### 6.7.4.5 Effektive Abbaukonstante $\lambda_{\text{eff},r,m}^{\text{Klima}}$

Eine Verdünnung der Radionuklidkonzentration erfolgt durch folgende Vorgänge.

- Wanderung von Radionukliden in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser ( $\lambda_{M,r,m}^{\text{Klima}}$ )
- Erhöhung der Stärke der relevanten Bodenschicht durch Deposition von anderswo erodierten Bodenteilchen und durch Zufuhr von organischer Substanz, die langfristig zu Humus abgebaut wird ( $\lambda_{\text{Dep},r,m}^{\text{Klima}}$ )
- Erhöhung der Bodenstärke durch Verwitterung des Ausgangsgesteins und Neubildung von Boden ( $\lambda_{N,m}^{\text{Klima}}$ )
- Erosion der obersten Bodenschichten durch Wind und Wasser ( $\lambda_{E,m}^{\text{Klima}}$ )

- Radioaktiver Zerfall ( $\lambda_r$ )

Die Verdünnung von Radionukliden durch Zufuhr von unbelastetem Boden und die Erosion der oberen Bodenschichten sind klimaabhängige Vorgänge, die Verdünnung durch Abwanderung von Radionukliden ist außerdem auch radionuklidspezifisch. Die Abbaukonstante  $\lambda_{\text{eff},r,m}^{\text{Klima}}$  muss daher nach Formel 6.3 klima- und radionuklidspezifisch ermittelt werden.

$$\lambda_{\text{eff},r,m}^{\text{Klima}} = \lambda_{\Gamma} + \lambda_{M,r,m}^{\text{Klima}} + \lambda_{\text{Dep},m}^{\text{Klima}} + \lambda_{N,m}^{\text{Klima}} + \lambda_{E,m}^{\text{Klima}} \quad (6.3)$$

#### 6.7.4.6 Transferkoeffizient für die Wanderung von Radionukliden in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser ( $\lambda_{M,r,m}^{\text{Klima}}$ )

Die Größe der Parameterwerte für die Beschreibung dieser Vorgänge ist noch umstritten, obwohl eine Fülle von Untersuchungen über die Wanderung von Radionukliden im Boden vorliegt. Die Nutzbarkeit dieser Untersuchungen für die hier betrachteten Langzeitbedingungen ist jedoch eingeschränkt, weil erst vierzig Jahre seit der höchsten Deposition von langlebigen Radionukliden aus dem Bombenfallout in den frühen Sechzigerjahren und nur 16 Jahre seit der Katastrophe von Tschernobyl vergangen sind. Diese Zeit hat nicht annähernd ausgereicht, um Gleichgewichtsverhältnisse in den oberen Bodenschichten zu erreichen. In der vorliegenden Stellungnahme werden diese aber postuliert und dann erst die Wanderung der Radionuklide in tiefer gelegene Schichten modelliert.

Zur Veranschaulichung der aktuellen Lage im Boden folgen einige typische Angaben zur Verteilung von Radionukliden in unbearbeiteten und bearbeiteten Böden.

Bunzl /BUN 95a/ untersuchte 1991 einen Podsolboden unter einem Nadelwald. 28 Jahre nach dem Maximum des Bombenfallouts befanden sich zwei Drittel des Plutoniums immer noch im Auflagehorizont, und nur ein Drittel im Boden selbst. Gleichwohl waren Plutoniumspuren bis in etwa 30 cm Bodentiefe anzutreffen. Die Verteilung kann mit einer Exponentialkurve beschrieben werden. Eine mögliche Erklärung: Plutonium wird wie auch Caesium zu einem bedeutenden Teil an die Huminsäuren im Rohhumus gebunden /LEE 00/, die über Fulvosäuren aus der Nadelstreu entstehen



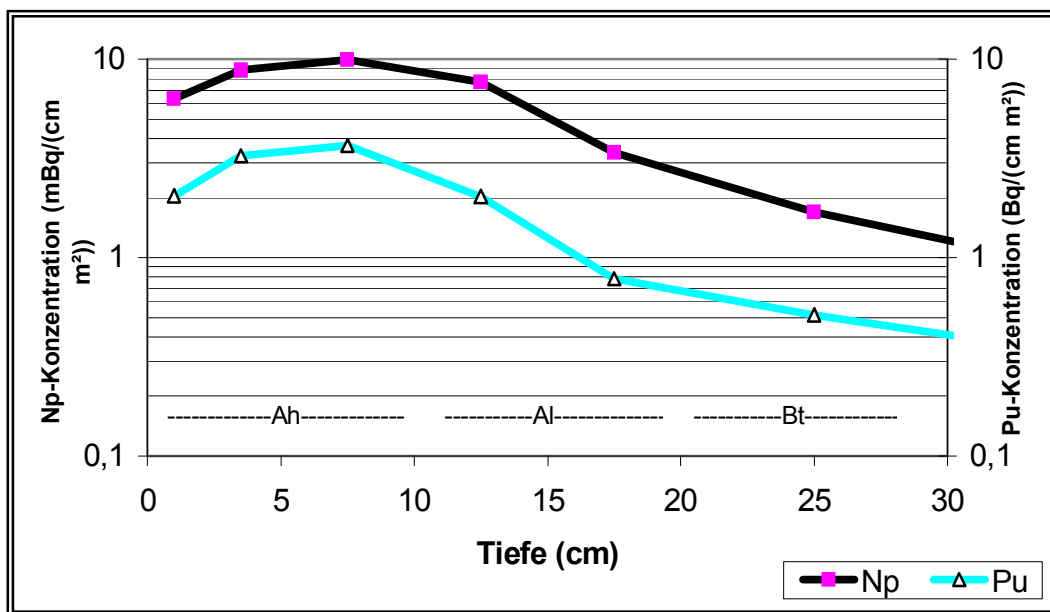
/HEN 97/ und in dem herrschenden sauren Milieu (pH 2.3 bis 3.3) mit dem Niederschlagswasser in den Boden eingewaschen werden. Regenwürmer fehlen bei solch einer Azidität. Enchyträen, Collembolen, Milben und Mikroorganismen bauen keine langen vertikalen Gänge. Sie zersetzen die Huminsäuren, wodurch das Plutonium für das saure Bodenwasser angreifbar wird und daher durch die Bodenporen ausgewaschen wird. Podsolboden enthält nämlich neben den Abbauprodukten der Streu kaum weitere Kolloide, die das Plutonium binden und aufhalten könnten, es läuft daher mit Geschwindigkeiten von 0.5 bis 1.5 cm/a durch die obersten Bodenschichten. Americium und Caesium aus Bombenfallout bewegen sich ähnlich schnell, Caesium aus Tschernobyl mit 1 bis 4 cm/a noch etwas schneller. Was in den tieferen Schichten geschieht, lässt sich bei dieser Untersuchungsart nicht feststellen. Tatsache ist, dass die Lebensbedingungen wieder günstiger sind, hier bildet sich daher die zweite Etage der Wurzeln aus. Bäume können dementsprechend auch die Radionuklide der unteren Schichten aufnehmen.

Im Boden unter Grasland liegen die Verhältnisse anders, da bei der Zersetzung von Kräutern und Gräser nicht so starke Säuren entstehen. Der Boden ist daher weniger lebensfeindlich, und der Auflagehorizont wird schneller in den mineralischen Boden eingearbeitet. Bunzl /BUN 95b/ untersuchte hier die Wanderung von Plutonium, Neptunium, Americium und Caesium in einer leicht pseudovergleyten Parabraunerde mit einem pH zwischen 4.1 und 4.4, das ist genau der Grenzbereich, bis zu dem Tauwürmer aktiv sind /MAK 94/. Der Tauwurm (*Lumbricus terrestris*) zeichnet sich unter den Regenwürmern dadurch aus, dass er sehr tiefe senkrechte Röhren baut, während viele andere Regenwurmarten flache Röhren innerhalb eines Bodenhorizontes bevorzugen /SCH 86/. Abbildung 6.1 zeigt, dass in diesem Boden Plutonium und Neptunium im Mittel pro Jahr ungefähr 0.4 cm tiefer wandern. Americium läuft ebenso schnell, Caesium etwas schneller. Die höchsten Geschwindigkeiten werden im Tonauswaschungshorizont Al beobachtet, während darunter eine Verlangsamung eintritt /BUN 95b/. Dies korrespondiert mit den Erkenntnissen der Bodenkunde, denn der Bt-Horizont hat seine braune Farbe von der Ausfällung der weiter oben ausgewaschenen Bodenbestandteile, insbesondere vom Eisen /HEN 97/.

In Abbildung 6.1 wird an Stelle der Radionuklidkonzentration in der Dimension Bq/kg Boden die Radionuklidmenge in einer 1 cm dicken Bodenschicht unter einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> angegeben (Bq/cm m<sup>2</sup>), dadurch wird der Einfluss der in tieferen Boden-

schichten geringeren Porosität, die sich in einer höheren Trockenlagerungsdichte widerspiegelt, ausgeglichen. Der Konzentrationsverlauf ist typisch. Die Tatsache, dass ein Teil der Radionuklide sehr schnell nach unten wandert, während die höchste Konzentration in geringer Tiefe vorliegt, legt nahe, dass ein bedeutender Teil des Transport entlang bestehender Gänge erfolgt. Hier bieten sich die Bodenporen an. Die größeren Bodenporen sind der Lebensraum der Tauwürmer. Sie ernähren sich von Humus /MAK 94/, der die Aktiniden und Caesium fest bindet /LEE 00/ und kleiden ihre Wohnröhren mit ihrem Kot aus /SCH 86/, der auf Grund der Ernährungsweise reich an diesen Radionukliden ist. Auf diese Weise können Tauwürmer für eine schnelle vertikale Verteilung der Radionuklide im Boden sorgen. Außerdem werden Bodenpartikel bei starkem Regen durch die Regenwurmröhren in tiefere Bodenschichten gespült.

**Abb. 6.1** Konzentration von Pu 239,240 und Np 237 in einem unbearbeiteten Wiesenboden, berechnet nach Angaben in /BUN 95b/<sup>1</sup>



Tauwürmer setzen auch einen bedeutenden Teil ihres Kotes an der Bodenoberfläche ab /MAK 94/ und bewirken damit eine Beförderung der Radionuklide von unten nach oben. Untersuchungen in /SCH 86/ zeigen nämlich, dass die Schwermetallkonzentra-

<sup>1</sup> Ah ist der Humushorizont unterhalb des Wurzelfilzes, Al der Tonauswaschungshorizont und Bt der Braune Tonhäutchenhorizont

tion in Tauwürmern und ihren Ausscheidungen unabhängig davon ist, ob die Schwermetalle dem Boden an der Oberfläche oder in der Tiefe zugesetzt wurden. Von einer Aufwärtsbewegung ist in Abbildung 6.1 nichts zu erkennen, da die Radionuklidkonzentration im Bt-Horizont noch sehr gering ist; ein etwaiger Transport von Radionukliden aus der Tiefe nach oben kann schon daher quantitativ noch nicht signifikant sein.

Die Lebensweise der Tauwürmer kann zur Folge haben, dass humusgebundene Radionuklide schneller wandern als Radionuklide, die im Boden als anorganische Moleküle vorliegen. An Humus gebunden sind Radionuklide aus dem Beregnungswasser, die entweder von den Pflanzenoberflächen oder der Streuschicht zurückgehalten wurden oder die über Wurzeln und Blätter in Pflanzen aufgenommen wurden. In beiden Fällen gelangen sie mit dem Blattfall und mit abgestorbenen Wurzeln auf und in den Boden. Radionuklide, die mit dem Beregnungswasser direkt auf den nackten Boden gelangen, liegen dagegen anfangs als anorganische Verbindungen vor und können nur durch biologische Vorgänge an Humus gebunden werden.

Messungen der Migrationsgeschwindigkeiten für Sr 90, Cs 137 und Pu 239,240 in den obersten 10 bis 20 cm starken Bodenschichten in vier Waldböden in Korea ergaben, dass die Unterschiede zwischen den Böden größer waren als zwischen den genannten Radionukliden /LEE 00/, obwohl die Sorptionseigenschaften der untersuchten Radionuklide sehr unterschiedlich sind /COU 85/. Dies zeigt, dass nicht (nur) die Sorptionseigenschaften ausschlaggebend für die Migrationsgeschwindigkeit sind. In Böden über Granit wurden Wanderungsgeschwindigkeiten von 0.10 bis 0.14 cm/a beobachtet, in Böden vulkanischen Ursprungs Geschwindigkeiten von 0.18 bis 0.28 cm/a.

Hölgge /HÖL 00/ berechnete die Migration von Plutonium und Caesium in humusreichen tonarmen Wiesenböden in Böhmen bis in 35 cm Tiefe. Danach liegt die Migrationsgeschwindigkeit für beide Radionuklide in den obersten 10 cm etwa zwischen 0.1 und 0.2 cm/a, während in diesen Böden in der Tiefe Geschwindigkeiten um 1 cm/a erreicht werden.

Zu anderen Ergebnissen kommt /ANT 95/ in einem leicht alkalischen Boden in Griechenland: Zwar dringt Caesium im ersten Jahr nach der Deposition bis zu etwa 0.5 cm tief in diesen Boden ein, dann aber verlagert es sich kaum noch weiter. Nach Unter-

suchungen von He /HE 97/ erfolgt nach experimenteller Berechnung ein schnelles Eindringen von Caesium und Blei in den Boden, wobei zwar 90 % sofort in den obersten 1.5 cm absorbiert werden, aber immerhin 10 % über die Bodenporen größere Tiefen erreichen. Die mittlere sofortige Eindringtiefe liegt hier bei ungefähr 0.3 cm, wobei die Eindringtiefe in unbearbeiteten Böden etwas größer als in bearbeiteten ist.

Pb 210 ist ein natürliches Radionuklid, das in der Atmosphäre aus Rn 226 entsteht und kontinuierlich mit dem Niederschlag auf die Erde deponiert wird. Deshalb sollte sich die Verteilung im Boden von den innerhalb von kurzer Zeit eingebrachten Radionukliden aus dem Bombenfallout der Sechzigerjahre und aus Tschernobyl unterscheiden, auch wenn die Halbwertszeit von Pb 210 nur 22 Jahre beträgt. Eine vergleichende Untersuchung wurde in unbearbeiteten Böden in Devon (England) für Cs 137 und Pb 210 angestellt /HE 97/ und daraus die Erosionsrate berechnet. Die Daten erlauben aber auch die Ermittlung der Migrationsrate von Pb 210. Die mittlere Ablagerungsrate (Dep/Zeit) von Pb 210 ist bekannt. Von der Bodenoberfläche wandert das Pb 210 nach unten, so dass sich im Gleichgewicht folgende Beziehungen einstellen

$$C_{\text{Pb210}}^{\text{m=Devon}} = \frac{\text{Dep/Zeit}}{P_{\text{m=Devon}}^{\text{Klima=Devon}} \cdot \lambda_{\text{eff,Pb210,m=Devon}}^{\text{Klima=Devon}}} \quad (6.4)$$

und

$$\frac{d_{\text{m=Devon}}^{\text{Klima=Devon}}}{M_{\text{eff,Pb210,m=Devon}}^{\text{Klima=Devon}}} = \frac{\ln 2}{\lambda_{\text{eff,Pb210,m=Devon}}^{\text{Klima=Devon}}} \quad (6.5)$$

$M_{\text{eff,Pb210,m=Devon}}^{\text{Klima=Devon}}$  bedeutet hier die effektive Migrationsrate des Radionuklids Pb 210 in m/a, alle anderen Abkürzungen wurden bereits erklärt. Die effektive Migrationsrate setzt sich aus allen in Gleichung 6.3 genannten Komponenten zusammen.

Es stellt sich heraus, dass in der obersten 5 bis 10 cm starken Bodenschicht eine Migrationsrate im Bereich von 0.1 bis 0.2 cm/a zu beobachten ist, doch mit zunehmender Tiefe nimmt sie rasch ab, bis sie sogar negativ wird. Hierfür kann es zwei verschiedene Ursachen geben, die auch nebeneinander vorliegen können. Luftbürtiges Pb 210 kann durch Bodenwürmer umverteilt werden, Pb 210 kann aber auch an Ort und Stelle aus Rn 222 entstehen, da das Mutternuklid Ra 226 durch Verwitterung des

Ausgangsgesteines in den Boden gelangt und sein Tochterprodukt Rn 222 in der Bodenluft aufwärts strebt, wo es zu Pb 210 zerfällt. Dass die Wanderungsbewegung von Pb 210 im Boden in der Tiefe zum Stillstand kommt, ist daher kein Beweis für die Aufwärtsbewegung von Ra 226 oder Pb 210 im Boden.

Auch in Torf ist eine vertikale Bewegung von inaktivem Blei nicht festzustellen. Noch nach hundert Jahren sind die verschiedenen Ablagerungsbänder den Ursachen (Nutzung von verbleitem Benzin, Bleiverhüttung, Kohleverstromung u. a.) zuzuordnen, ohne dass die Bänder ausfransen /SHO 97, VIL 95/. Dass die einzelnen Bänder unterschiedlich tief liegen, beruht hauptsächlich auf dem Wachstum des Moores, außerdem auch auf der Deposition von Material von außerhalb. Mit einer wesentlichen Bioturbation ist nicht zu rechnen, da das Milieu für Regenwürmer zu sauer ist. Aber der hohe Grundwasserstand sollte eine Verlagerung von Blei begünstigen, was aber nicht beobachtet werden konnte.

Diese wenigen Beispiele mögen veranschaulichen, dass über die Migrationsraten und die ihnen zugrunde liegenden Mechanismen wie Bioturbation, Sorption und Desorption, Diffusion und Advektion und die Veränderung der Pflanzenverfügbarkeit durch Alterung, chemischen Aufschluss durch Mikroorganismen und Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln usw. sowie die Beeinflussung dieser Vorgänge durch die weiteren Bodenparameter (Konzentration zahlreicher stabiler Stoffe, Azidität u. a.) noch so wenig bekannt ist, dass ein fundiertes Urteil über die Migrationsgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Böden und für eine ganze Palette von Radionukliden im Rahmen dieser Ausarbeitung unmöglich erscheint.

Ein anderer Ansatz orientiert sich an der Verteilung der Spurenelemente im Boden. /RÖS 76/ zitiert die stoffliche Zusammensetzung eines Podsolbodens (20 Elemente) bis in über 1 m Tiefe. Danach ist im B-Horizont die Konzentration von Aluminium, Eisen, Mangan und Kalium doppelt so hoch wie im A-Horizont, die von Magnesium sogar dreimal so hoch, aber viele andere Hauptkomponenten und Spurenelemente sind ziemlich gleichmäßig über das ganze Bodenprofil verteilt. Da diese Elemente aus dem Ausgangsgestein stammen, zeigt diese Aufstellung die unterschiedlichen Wanderungseigenschaften der verschiedenen Elemente. Wenig bewegliche Elemente werden offensichtlich zwar innerhalb der oberen Horizonte durch Bioturbation umverteilt, jedoch nicht signifikant ausgewaschen. Bei den beweglichen Elementen reicht die

Aktivität der Tauwürmer dagegen nicht aus, den Auswaschungseffekt zu kompensieren.

#### **6.7.4.7 Verdünnung durch Zufuhr von unkontaminiertem Boden**

Die Erhöhung der Stärke der relevanten Bodenschicht durch Deposition von ortsfremden Bodenteilchen und durch Zufuhr von organischer Substanz, die langfristig zu Humus abgebaut wird, ist ein klimaabhängiger Vorgang, der zusätzlich durch die Vegetation beeinflusst wird. Einerseits fangen bewachsene Flächen mehr Bodenteilchen aus der Luft auf als unbewachsene, andererseits halten sie sie besser fest, denn der Bewuchs behindert die Winderosion.

Eine nachhaltige Zufuhr von organischer Substanz zum Boden ist nicht zu erwarten, wenn Pflanzen zum Zweck der Ernte und nicht zur Bodenverbesserung kultiviert werden. Künstlich zur Düngung eingebrachte organische Substanz wird binnen kurzer Zeit zersetzt und führt nicht zu einer Erhöhung der Stärke der den Pflanzen zur Verfügung stehenden Bodenschicht. Eine Ausnahme ist nur auf unbearbeiteten Flächen zu erwarten, z. B. im Weidegebiet der Rentiere. Das Weidegebiet der Rentiere wird jedoch nicht beregnet, und im Überschwemmungsgebiet werden die Verhältnisse durch die häufigen Überschwemmungen bestimmt, so dass dies irrelevant ist.

Die Konzentration von Staub in der Luft muss unter ariden und semiariden Klimabedingungen höher sein als unter humiden Klimabedingungen, in Gebieten ohne Schneebedeckung größer als in Gebieten mit ausgeprägter winterlicher Schneedecke. Von Pflanzen emittierte Substanzen sind quantitativ nicht von großer Bedeutung. Der Staub wird insbesondere von unbearbeiteten Flächen aufgewirbelt, mit dem Wind verfrachtet, wobei die zurückgelegten Strecken beträchtlich sein können, und schließlich trocken und nass deponiert. Dabei wird die Deposition von der Korngröße und der stofflichen Zusammensetzung des Schwebstaubs sowie den Eigenschaften des Bewuchses beeinflusst. Die deponierten Mengen hängen mithin von der Konzentration in der Luft, vom Niederschlag, von der Zusammensetzung und der Korngröße und von der Höhe und dem Blattflächenindex des Bewuchses ab. In Tabelle 6.21 werden Faustzahlen für die verschiedenen Klimabedingungen angegeben, die mit beträchtlicher Unsicherheit behaftet sind. Für die Korngrößenverteilung wird dabei in allen Fällen ein mittlerer Durchmesser von 1 bis 3  $\mu\text{m}$  zugrunde gelegt, das ist der Mittelwert in

/JAF 88, HOR 96/. Die Depositionsgeschwindigkeit beträgt für diese Partikelgröße etwa 0.0015 m/s /BMU 01/; die Auswaschungsrate von im Mittel 500 m<sup>3</sup> Luft / l Regen wurde abgeleitet aus Angaben in /JAF 88/ unter Berücksichtigung der stofflichen Zusammensetzung des Schwebstaubs in Reinluftgebieten nach /MAT 00/.

**Tab. 6.21** Jährliche Deposition von Schwebstaub

Klima	Konzentration von Schwebstaub in der Luft (mg/m <sup>3</sup> )	Niederschlag (mm/a)	Trockene Deposition (g/m <sup>2</sup> a)	Nasse Deposition (g/m <sup>2</sup> a)	Gesamte Deposition (g/m <sup>2</sup> a)
Df	0.01	600	0.5	3	3.5
Dw	0.2	150	10	15	25
Cf	0.03	600	1.4	9	10
Es	0.2	900	10	90	100

Die Werte können verglichen werden mit der Deposition über der Nordsee. In /INJ 98/ wird die trockene Deposition zu im Mittel 0.28 g/m<sup>2</sup> a und die nasse Deposition zu 1.1 g/m<sup>2</sup> a berechnet. Natürlich ist über der Nordsee mit einer geringeren Deposition als auf dem Festland zu rechnen. Bei einem Korngewicht von 2.65 g/cm<sup>3</sup> und einer Porosität von 0.5 folgt aus den Werten in Tabelle 6.21, dass im Jahr zwischen 0.0026 und 0.075 mm Boden zugeführt werden.

#### 6.7.4.8 Verwitterung des Ausgangsgesteins und Neubildung von Boden

Zahlreiche Prozesse tragen zur Verwitterung bei. Unter arktischen, semiariden und ariden Klimabedingungen spielen physikalische Prozesse wie Frostsprengung, Insolationsverwitterung, Hydratation und Salzsprengung die bedeutendste Rolle. Die überall zu beobachtende Sprengung durch Pflanzenwurzeln gehört letztlich ebenfalls zu den physikalischen Prozessen. Chemische Prozesse herrschen unter humiden Bedingungen in den gemäßigten und tropischen Breiten vor. Dazu gehören Lösungsverwitterung, die durch ein saures Milieu im Boden noch verstärkt wird, Kohlensäureverwitterung bei Abundanz von Humussäuren und hohem CO<sub>2</sub>-Partialdruck in der Bodenluft, die zur Entkalkung des Bodens führt, Silikatverwitterung (Hydrolyse), bei der Kaliumalumosilikat zu Tonerde, Kieselsäure und Kalilauge abgebaut wird, wodurch der Podsolbildung und der Lessivierung Vorschub geleistet wird, Oxidationsverwitterung, bei der im Mittelmeerraum Roterden entstehen, und Reduktionsverwitterung, die bei der Vergleyung eine Rolle spielt, sowie ähnliche Prozesse /HEN 97/.

Die auf diese Weise entstehenden Bodentiefen hängen vom Verwitterungsmechanismus ab. In den Tropen können Böden mit Verwitterungstiefen bis zu 200 m auftreten /HEN 97/, Pflanzenwurzeln können ihre Sprengwirkung je nach Art bis zu mehrere Meter tief entfalten, wie aus der Wurzellänge folgt, Frostsprengung wirkt im Bereich von Dezimetern bis 1 m, Salzsprengung im Bereich von Zentimetern /HEN 97/. In allen Fällen kommt es schließlich, wenn die über dem Gestein liegende Bodenschicht zu dick geworden ist, zum Erliegen der Bodenreuebildung von unten. Daher ist der Vorgang der Bodenreuebildung durch Verwitterung des Ausgangsgesteins hier nicht zu beachten.

#### **6.7.4.9 Erosion der obersten Bodenschichten**

Hier handelt es sich um Prozesse, bei denen Bodenteilchen samt der darin befindlichen Radionuklide entfernt werden. Ursache ist der Angriff durch Wind und Wasser. Die Erosionsgefährdung durch Wasser ist am höchsten in Hanglagen und bei heftigen Regenfällen, die Erosion durch Wind umgekehrt bei Trockenheit. Vegetation behindert die Erosion in beiden Fällen.

Erosion bewirkt eine Verringerung der Radionuklidkonzentration im Boden, wenn das abgetragene Material eine höhere Radionuklidkonzentration aufweist als das zurückbleibende, insbesondere wenn das erodierte Material durch Verwitterung des Ausgangsgesteins ersetzt wird. Wenn die Bodenerosion stärker als die Bodenreuebildung ist, verliert der Boden seine Fruchtbarkeit, wird nicht mehr landwirtschaftlich genutzt und folglich auch nicht mehr beregnet.

Auf ebenen Flächen mit geringer Erosionsneigung wird sich langfristig eine weitgehend homogene Verteilung der extrem langlebigen Radionuklide im Boden ergeben, wie die Verteilung von 15 Pflanzennährstoffen und Spurenelementen nahe legt /RÖS 76/. Für kurzlebige Radionuklide gilt dies zwar nicht, wie die Verteilung von Pb 210 in unbearbeiteten Böden /HE 95/ zeigt, aber eine Freisetzung von kurzlebigen Radionukliden aus einem Endlager ist nicht zu besorgen, außer im Falle von kurzlebigen Töchtern langlebiger Mutternuklide. Diese gelangen aber hauptsächlich nicht mit dem Beregnungswasser von oben in den Boden, sondern sie entstehen im Boden aus ihren Mutternukliden, und daher gehorchen sie den Gesetzmäßigkeiten von langlebigen Radionukliden.



#### 6.7.4.10 Verdünnung durch Aufnahme über die Wurzeln in Pflanzen

Dieser Abbaumechanismus wird konservativ vernachlässigt, da angenommen wird, dass die Radionuklide bei der Düngung mit Kompost und Exkrementen von Mensch und Tier zurück in den Boden gelangen.

#### 6.7.4.11 Festlegung der Abbaukonstanten

Relevant sind außer der radioaktiven Zerfallskonstanten  $\lambda_r$  nur die Abbaukonstante für das Abwandern in tiefe Bodenschichten  $\lambda_{M,r,m}^{\text{Klima}}$ , insbesondere unter den Bedingungen der Podsolböden, in geringeren Maße auch bei Fahlerden und Braunerden, außerdem unter allen Klimabedingungen die Verdünnungskonstante  $\lambda_{\text{Dep},m}^{\text{Klima}}$  und die Konstante für den Abbau durch Erosion  $\lambda_{E,m}^{\text{Klima}}$ .

Für die Migrationsraten können einstweilen nur sehr grobe Faustzahlen angegeben werden; dazu werden die Radionuklide entsprechend dem Vorgehen in /PRÖ 95/ in drei Klassen eingeteilt. Die erste Klasse der extrem leicht beweglichen Radionuklide kann durch Kalium repräsentiert werden; aus Düngeversuchen ist bekannt, dass eine Depotdüngung nicht möglich ist. Damit beträgt die Migrationsgeschwindigkeit  $M_{K,m=\text{Podsol}}^{\text{Klima=Df}}$  in Podsolböden im kühlgemäßigen Klima Df mindestens 10 cm/a; für die zweite Klasse der leichtbeweglichen Radionuklide wird eine Migrationsgeschwindigkeit von  $M = 3$  cm/a angesetzt und für die schwer beweglichen Radionuklide  $M = 1$  cm/a. Bei der Festsetzung der entsprechenden Wertes für Podsolböden in anderen Klimagebieten wird berücksichtigt, dass der Boden im Klimagebiet Cf weniger Niederschlag bei höherer Evapotranspiration erhält. Als Wanderungsgeschwindigkeit in Fahl- und Braunerden im Klima Cf werden jeweils 20 % der Werte für Podsolböden in diesem Klima angesetzt; in Schwarzerden ist die Wanderung minimal und wird tentativ mit 1% der Wanderung in Podsol angesetzt. Im Etesienklima werden die Radionuklide zwar im Winter wegen der intensiven Regenfälle ausgewaschen, aber im Sommer wandern sie auf Grund der hohen Evaporation tendenziell nach oben. Radionuklide, die bei Starkregen oberflächlich ablaufen, werden dagegen nicht wieder zurückgeholt. Das Ausmaß des Ablaufs wird durch die Hangneigung beeinflusst. Wenn konservativ angenommen wird, dass die landwirtschaftlich genutzten Flächen eben sind, kann der Ablauf vernachlässigt werden.

Tabelle 6.22 enthält die Zuordnung der Elemente zu den Klassen I, II und III. In Tabelle 6.23 werden die Abbaukonstanten für die Migration zusammengefasst. Diese Werte sind noch als vorläufig zu verstehen. Tabelle 6.24 zeigt die berechneten Abbaukonstanten für die Verdünnung im Boden durch Ablagerung von Staub.

**Tab. 6.22** Zuordnung der Elemente zu den Migrationsklassen /BMU 01/ (ergänzt)

Klasse	Elemente
I	Cl, Rb, Tc,
II	Ca, Se, Sr, Mo, Sn, I, Ra, Np
III	Co, Ni, Zr, Nb, Pd, Cs, Sm, Eu, Pb, Po, Ac, Th, Pa, U, Pu, Am, Cm

**Tab. 6.23** Abbaukonstanten für die Migration  $\lambda_{M,r,m}^{Klima}$

Klima	Klasse	$M_{r,m}^{Klima}$ (m/a)	$d_m^{Klima}$ (m)	$\lambda_{M,r,m}^{Klima}$ (s <sup>-1</sup> )	$d_m^{Klima}$ (m)	$\lambda_{M,r,m}^{Klima}$ (s <sup>-1</sup> )
Feuchtwinterkaltes Klima Df Süden	I	0.1	0.1	2.2 10 <sup>-8</sup>	0.2	1.1 10 <sup>-8</sup>
	II	0.03		6.6 10 <sup>-9</sup>		3.3 10 <sup>-9</sup>
	III	0.01		2.2 10 <sup>-9</sup>		1.1 10 <sup>-9</sup>
Wintertrockenes Klima Dw Norden Süden	I	0.027	0.1	5.9 10 <sup>-9</sup>	0.2	2.9 10 <sup>-9</sup>
	II	0.008		1.8 10 <sup>-9</sup>		8.8 10 <sup>-10</sup>
	III	0.0027		5.9 10 <sup>-10</sup>		2.9 10 <sup>-10</sup>
	I	0.047	0.1	1.0 10 <sup>-8</sup>	0.2	5.1 10 <sup>-9</sup>
	II	0.014		3.1 10 <sup>-9</sup>		1.5 10 <sup>-9</sup>
	III	0.0047		1.0 10 <sup>-9</sup>		5.1 10 <sup>-10</sup>
Feuchtgemäßigtes Klima Cf „Edinburgh“ „Hannover“ „Prag“ „Paris“	I	0.093	0.1	2.1 10 <sup>-8</sup>	0.2	1.0 10 <sup>-8</sup>
	II	0.028		6.2 10 <sup>-9</sup>		3.1 10 <sup>-9</sup>
	III	0.0093		2.1 10 <sup>-9</sup>		1.0 10 <sup>-9</sup>
	I	0.0093	0.1	2.1 10 <sup>-9</sup>	0.2	1.0 10 <sup>-9</sup>
	II	0.0028		6.2 10 <sup>-10</sup>		3.1 10 <sup>-10</sup>
	III	0.00093		2.1 10 <sup>-10</sup>		1.0 10 <sup>-10</sup>
	I	0.001	0.6	3.7 10 <sup>-11</sup>	0.6	3.7 10 <sup>-11</sup>
	II	0.00033		1.2 10 <sup>-11</sup>		1.2 10 <sup>-11</sup>
	III	0.0001		3.7 10 <sup>-12</sup>		3.7 10 <sup>-12</sup>
	I	0.011	0.3	7.8 10 <sup>-10</sup>	0.3	7.8 10 <sup>-10</sup>
	II	0.0032		2.3 10 <sup>-10</sup>		2.3 10 <sup>-10</sup>
	III	0.0011		7.8 10 <sup>-11</sup>		7.8 10 <sup>-11</sup>
Etesienklima Es „Mailand“ und „Rom“	I	0.003	0.5	1.3 10 <sup>-10</sup>	0.5	1.3 10 <sup>-10</sup>
	II	0.001		4.4 10 <sup>-11</sup>		4.4 10 <sup>-11</sup>
	III	0.0003		1.3 10 <sup>-11</sup>		1.3 10 <sup>-11</sup>

**Tab. 6.24** Abbaukonstanten für die Deposition von Schwebstaub  $\lambda_{\text{Dep,r,m}}^{\text{Klima}}$

Klima	Zufuhr (g/m <sup>2</sup> a)	Unter Weiden		Unter Äckern	
		Flächen- trockenmasse $p_m^{\text{Klima}}$ (kg/m <sup>2</sup> ) □ □ □	$\lambda_{\text{Dep,r,m}}^{\text{Klima}}$ (s <sup>-1</sup> )	Flächen- trockenmasse $p_m^{\text{Klima}}$ (kg/m <sup>2</sup> ) □ □ □	$\lambda_{\text{Dep,r,m}}^{\text{Klima}}$ (s <sup>-1</sup> )
Feuchtwinterkaltes Klima Df	3.5	150	$5.3 \cdot 10^{-13}$	320	$2.4 \cdot 10^{-13}$
Wintertrockenes Klima Dw	25	150	$3.8 \cdot 10^{-12}$	320	$1.7 \cdot 10^{-12}$
Feuchtgemäßigtes Klima Cf					
I „Edinburgh“	10	150	$1.5 \cdot 10^{-12}$	320	$6.9 \cdot 10^{-13}$
II „Hannover“	10	120	$1.8 \cdot 10^{-12}$	290	$7.5 \cdot 10^{-13}$
III „Prag“	10	800	$2.8 \cdot 10^{-13}$	800	$2.8 \cdot 10^{-13}$
IV „Paris“	10	440	$5.0 \cdot 10^{-13}$	440	$5.0 \cdot 10^{-13}$
Etesienklima Es	100	730	$3.0 \cdot 10^{-12}$	730	$3.0 \cdot 10^{-12}$

Die Erosion durch Wasser wird in ebenem Gelände allgemein gering sein und wird hier konservativ null gesetzt. Die Erosion durch Wind ist das Pendant zur Deposition (siehe Tabelle 6.24), denn langfristig muss das erodierte Material wieder deponiert werden. Daher wird angenommen, dass die Abbaukonstanten  $\lambda_{\text{E,m}}^{\text{Klima}}$  gleich den in Tabelle 6.24 angegebenen Abbaukonstanten  $\lambda_{\text{Dep,m}}^{\text{Klima}}$  sind. Weideboden unterliegt auf Grund des dichten Bewuchses nicht der Erosion durch Wind.

Eine Überprüfung der hier berechneten Werte für  $\lambda_{\text{eff,r,m}}^{\text{Klima}}$  ist für die Radionuklide Sr 90 und Cs 137 für das Szenario „Hannover“ an Hand der Jahresberichte des Umweltministeriums (stellvertretend sei /BMU 95/ genannt) möglich. Aus den Jahresreihen ergeben sich in den Siebziger- und Achtzigerjahren für den norddeutschen Raum Werte, die mit den hier abgeleiteten Werten gut korrespondieren; inzwischen sind die Abbaukonstanten jedoch kleiner geworden, in einigen Bundesländern in Nord- und Ostdeutschland ist sogar eine signifikante Erhöhung der Konzentration zu beobachten; offensichtlich wird hier mehr Sr 90 und Cs 137 deponiert als im gleichen Zeitraum abgebaut wird; die neueren Messergebnisse können daher nicht zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

### 6.7.5 Aufnahme über die Wurzeln

In /BMU 01/, ergänzt durch /BMU 99/, werden Transferfaktoren für den Übergang von Radionukliden aus dem Boden in Pflanzen angegeben. Diese Transferfaktoren gelten für den in /BMU 01/ zu Grunde gelegten Nahrungskorb aus Getreide, Wurzelgemüse, Obst und Blattgemüse. Da in der hier vorliegenden Abhandlung klimaspezifisch unterschiedliche Nahrungskörbe zusammengestellt werden, müssten eigentlich auch unterschiedliche Tabellen für die Transferfaktoren der Pflanzenkategorien "Weidebewuchs" ( $T_r^W$ ), "Blattgemüse" ( $T_r^B$ ), "Kartoffeln und Wurzelgemüse" ( $T_r^K$ ), "Obst und Fruchtgemüse" ( $T_r^O$ ) und "Getreide" ( $T_r^G$ ) erstellt werden. Da außerdem die Bodeneigenschaften einen Einfluss auf die Höhe der Transferfaktoren ausüben, müssten diese Transferfaktoren getrennt für jedes Klimagebiet angegeben werden. Solch differenzierte Kenntnisse liegen jedoch nicht für jedes einzelne Radionuklid vor.

Es wird daher empfohlen, im Falle aller Radionuklide, über die zu wenig Kenntnisse vorliegen, die in Tabelle 6.25 als „ $T_r^P$ “ angegebenen Transferfaktoren (Transferfaktoren für die Gesamtheit der Pflanzen, die dem Menschen zur Nahrung dienen) benutzen. Weitere Transferfaktoren werden für ausgesuchte Radionuklide und Pflanzenteile angegeben, die entsprechenden Quellen folgen in Tabelle 6.26. Wenn es das vorliegende Datenmaterial erlaubte, wurden Transferfaktoren für sandigen Boden mit dem pH 5 ausgewählt. Das entspricht noch am ehesten den derzeit an den niedersächsischen Standorten bestehenden Verhältnissen in landwirtschaftlich genutzten Böden.

Diese Transferfaktoren werden bis auf Weiteres für alle Böden und Klimabedingungen angewendet.

**Tab. 6.25** Transferfaktoren für den Übergang ausgewählter Radionuklide aus dem Boden in einzelne Pflanzenteile

Radionuklid	$T_r^W$	$T_r^P$	$T_r^K$	$T_r^O$	$T_r^G$	$T_r^B$
	Bq/kg Pflanze (FM) : Bq/kg Boden (TM)					
C						
Cl	5	5				
Ca	0.2	0.06				
Co	0.02	0.02	0.02		0.003	0.03
Ni	0.02	0.02	0.03			
Se	0.5	0.5				
Rb	0.9	0.09				
Sr	0.4	0.4				
Zr	0.001	0.003				
Nb	0.01	0.01				
Mo	0.2	0.05				
Tc	3	3	0.05		0.6	20
Pd	0.02	0.02				
Sn	0.2	0.2				
I	0.1	0.02				
Cs	0.05	0.05	0.04	0.01	0.02	
Sm	0.003	0.003				
Eu	0.003	0.003				
Pb	0.01	0.007	0.0003		0.004	
Po	0.01	0.005	0.002		0.002	
Ra	0.01	0.005	0.0002	0.0004		
Ac	0.003	0.003				
Th	0.002	0.0005	$1 \cdot 10^{-5}$			
Pa	0.003	0.003				
U	0.003	0.003	0.002		0.001	
Np	0.02	0.02	0.002		0.002	0.003
Pu	$8 \cdot 10^{-5}$	0.0004	$3 \cdot 10^{-5}$		$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Am	0.0003	0.0003	$2 \cdot 10^{-5}$		$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Cm	0.0003	0.0003	$3 \cdot 10^{-5}$		$2 \cdot 10^{-5}$	

**Tab. 6.26** Quellen für die Transferfaktoren für den Übergang von Radionukliden aus dem Boden in einzelne Pflanzenteile (Tabelle 6.25)

Radionuklid	$T_r^W$	$T_r^P$	$T_r^K$	$T_r^O$	$T_r^G$	$T_r^B$
C						
Cl	/BMU 01/	/BMU 01/				
Ca	/BMU 01/	/BMU 01/				
Co	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	/IAEA 94/
Ni	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/			
Se	/BMU 01/	/BMU 01/				
Rb	/BMU 01/	/BMU 01/				
Sr	/BMU 01/	/BMU 01/				
Zr	/BMU 01/	/BMU 01/				
Nb	/BMU 01/	/BMU 01/				
Mo	/BMU 01/	/BMU 01/				
Tc	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	/IAEA 94/
Pd	/BMU 01/	/BMU 01/				
Sn	/BMU 01/	/BMU 01/				
I	/BMU 01/	/BMU 01/				
Cs	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/	/IAEA 94/	/IAEA 94/	
Sm	/BMU 01/	/BMU 01/				
Eu	/BMU 01/	/BMU 01/				
Pb	/BMU 99/	/BMU 99/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	
Po	/BMU 99/	/BMU 99/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	
Ra	/BMU 99/	/BMU 99/	/IAEA 94/	/IAEA 94/		
Ac	/BMU 99/	/BMU 99/				
Th	/BMU 99/	/BMU 99/	/IAEA 94/			
Pa	/BMU 99/	/BMU 99/				
U	/BMU 99/	/BMU 99/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	
Np	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	/IAEA 94/
Pu	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	/IAEA 94/
Am	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	/IAEA 94/
Cm	/BMU 01/	/BMU 01/	/IAEA 94/		/IAEA 94/	

In allen vorstehenden Tabellen fehlt die Zuckerrübe, obwohl sie zu den Pflanzen gehört, die besonders viel Wasser verbrauchen. Der Grund liegt darin, dass Kristallzucker so arm an Mineralstoffen ist, dass auch die Radionuklidkonzentrationen vernach-

lässigbar sein werden. Olivenöl fehlt, weil es als "Obst" klassifiziert wird, bis geeignetere Berechnungsgrundlagen und Parameterwerte vorliegen.

## 6.8 Pfad: Unter-Glas-Kultur

Die Höhe der Radionuklidkonzentration in Pflanzen, die unter Glas gezogen werden, wird nach den gleichen Methoden berechnet wie bei Freilandpflanzen. Für die Kontamination in Folge der Aufnahme über die Blätter gelten die vereinfachte Formel 5.7.1 bzw. die Formeln 5.7.2 und 5.7.3. Nach Formel 5.7.4 wird die Radionuklidkonzentration im Boden berechnet, daraus folgt nach Formel 5.4.2 die Konzentration in der verzehrfertigen Pflanze. Unterschiede bestehen bei der Höhe einiger Parameterwerte. Diese Parameterwerte hängen nicht vom jeweiligen Klima im Freiland ab. Im Falle der Aufnahme von Radionukliden über die Blätter ist dies selbstverständlich, aber die Aussage trifft auch auf die Aufnahme aus dem Boden zu. Zwar kann auch im Treibhaus nur der Boden eingesetzt werden, der sich unter den bestehenden Klimabedingungen herausbildet, er wird aber verbessert mit dem Ziel eines leichten humosen Sandbodens.

Es wird davon ausgegangen, dass der gleiche Boden auf unbestimmte Zeit immer wieder als Substrat benutzt wird, wobei er aber in der Hälfte der Zeit zur Regeneration auf dem Komposthaufen liegt. Anschließend wird er gründlich vermischt, gedüngt und wieder benutzt, so dass er im Mittel alle Kulturen etwa gleichmäßig trägt.

Es wird davon ausgegangen, dass die Pflanzen im Treibhaus ebenso wie Freilandpflanzen berechnet werden, Wasser sparende Methoden wie direkte Bewässerung des Bodens bleiben außer Betracht. Die Berechnungsraten wurden in Abschnitt 4 ermittelt und sind in Tabelle 6.27 zusammengestellt. Außerdem werden hier die weiteren Parameterwerte angegeben, soweit sie von denen für Freilandpflanzen abweichen. Die Berechnungsrate ist im Treibhaus höher als im Freiland, da auch der natürliche Niederschlag durch Beregnung ersetzt werden muss. Die Intensität der Beregnung übertrifft mit durchschnittlich 2 mm/h /RUH 85/ die durchschnittliche natürliche Niederschlagsintensität im Freiland, wodurch die Radionuklide schneller abgewaschen werden. Die Pflanzen wachsen auch schneller. Darum ist die biologische Verweilkonstante  $\lambda_{v,Pflanze}^{Klima}$  auf den Blättern höher als unter Freilandbedingungen. Der Anteil der bei

der Beregnung auf den Pflanzen abgelagerten Radioaktivität beträgt wie im Freiland  $f_w = 0.3$ .

Die Luftfeuchtigkeit ist im Mittel in einem Treibhaus, in dem beregnet und nicht bewässert wird, höher als draußen. Die Feuchtigkeit auf den Blättern verdunstet daher langsamer, und die für die direkte Aufnahme von Radionukliden aus der Blattoberfläche in die Pflanzen günstigen Bedingungen bleiben länger erhalten als im Freiland. Für die Translokationsfaktoren  $f_{r,Pflanze}^{trans}$  wurden in Tabelle 6.18 jedoch pauschalierte Werte angesetzt, die noch so vorläufig sind, dass eine Anhebung wegen der Bedingungen im Treibhaus nur eine ungerechtfertigte Vortäuschung von Genauigkeit bedeuten würde.

**Tab. 6.27** Parameter zur Berechnung der Radionuklidkonzentration in den oberirdischen Pflanzenteilen von Unter-Glas-Kulturen

	Blattgemüse	Obst, Fruchtgemüse	Wurzelgemüse, Kartoffeln
Jahresbedarf in l/m <sup>2</sup>	350	550	420
Oberirdischer Ertrag in kg/m <sup>2</sup>	3	4	3
Biologische Verweilkonstante in s <sup>-1</sup>	$8 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$
Ertrag der zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile incl. Abfall in kg/m <sup>2</sup>	4	3	5
Beregnungsmenge bei der letzten Beregnung vor der Ernte in l/m <sup>2</sup>	25	25	25
Zeit zwischen der letzten Beregnung und der Ernte in s	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$
Zeit zwischen der Keimung und der letzten Beregnung in s	$4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$

Für die mittlere Beregnungsrate des Bodens über lange Zeiträume werden 250 l/m<sup>2</sup> a ( $8 \cdot 10^{-6}$  l/m<sup>2</sup> s) angesetzt. Dieser Wert berücksichtigt einerseits, dass der Boden nur in der Hälfte der Zeit beregnet wird, weil er in der übrigen Zeit auf dem Komposthaufen außerhalb des Gewächshauses liegt, und andererseits, dass er im Laufe der Zeit Pflanzen mit unterschiedlichem Wasserbedarf als Substrat dient.

Die Pflanzen wurzeln nicht in einem natürlich gewachsenen Boden, denn nahezu die gesamte Bodenschicht besteht aus dem A-Horizont, der O-Horizont ist dünn bis nicht



vorhanden, die B- und C-Horizonte fehlen. Damit ähnelt der Bodenaufbau einem Ackerboden, und die Transferfaktoren können übertragen werden.

Die Bodentiefe orientiert sich an den Bedürfnissen der Pflanze und beträgt zwischen 10 bis 30 cm bei den meisten krautigen Pflanzen und 1 m bei vielen Holzpflanzen. Da der Boden immer wieder verwendet wird, ist abweichend von der tatsächlichen Bodentiefe die mittlere Bodentiefe von 20 cm anzusetzen. Damit beträgt die Trockenlagerungsdichte  $290 \text{ kg/m}^2$ . Als Abbaukonstanten für die Migration im Boden können die Werte in Tabelle 6.21 für den Standort „Hannover“ eingesetzt werden.

Pflanzliche Produkte aus dem Treibhaus stehen ganzjährig zur Verfügung und werden deshalb kurz nach der Ernte verzehrt. Die Abklingzeit zwischen Ernte und Verzehr ist daher vernachlässigbar.

An Stelle von Erde können im Treibhaus auch andere Substrate zur Anwendung kommen, insbesondere ist Hydrokultur für die Anzucht von Sprossen und Keimen üblich, neuerdings bürgert sie sich auch für Blattgemüse zunehmend ein. Für diese Anbaumethode sind die in Tabelle 6.25 angegebenen Transferfaktoren nicht geeignet. Hydrokultur wird im Rahmen dieser Abhandlung nicht unterstellt.

## **6.9 Pfad: Verzehr von Milch und Fleisch von Tieren, die Futter von beregneten Weiden und Feldern erhalten haben**

Die meisten benötigten Parameterwerte wurden bereits angegeben. Die Berechnung der Kontamination des frischen Weidebewuchses geht aus Abschnitt 6.7 hervor. Abweichend hiervon muss die Berechnungsrate auf die gesamte Vegetationsperiode bezogen werden, denn die Tiere nehmen während der gesamten Weidezeit frischen Weidebewuchs auf und auch das Lagerfutter spiegelt die durchschnittliche Berechnung in der ganzen Vegetationsperiode wieder.

Da die Weiden nicht ganzjährig nutzbar sind, wird ein Teil des Weidebewuchses eingelagert. Die mittlere Lagerungsdauer wird aus den Angaben in Abschnitt 4 berechnet und geht aus Tabelle 6.28 hervor. Die tägliche Futteraufnahme beträgt  $65 \text{ kg/BMU 01/}$ , die Aufnahme von Boden  $0.5 \text{ kg}$ . Transferfaktoren für den Übergang vom Futter in Milch und Fleisch gehen aus Tabelle 6.9 hervor.

**Tab. 6.28** Jährlicher Beregnungsbedarf und Beregnungsperiode für Freilandpflanzen

Klima	Jahresbedarf in l/m <sup>2</sup>	Vegetationsperiode in d	Beregnungsrate in l/(m <sup>2</sup> s)	Zeit zwischen Ernte und Verzehr von Lagerfutter in s
Feuchtwinterkaltes Klima Df III Süden	100	120	1.0 10 <sup>-5</sup>	1.0 10 <sup>7</sup>
Wintertrockenes Klima Dw I, II Norden III Süden	60	30	2.3 10 <sup>-5</sup>	1.4 10 <sup>7</sup>
	200	90	2.6 10 <sup>-5</sup>	1.2 10 <sup>7</sup>
Feuchtgemäßigtes Klima Cf I „Edinburgh“ II „Hannover“ III „Prag“ IV „Paris“	80	140	6.6 10 <sup>-6</sup>	1.0 10 <sup>7</sup>
	110	165	7.7 10 <sup>-6</sup>	8.4 10 <sup>6</sup>
	130	155	1.0 10 <sup>-5</sup>	8.9 10 <sup>6</sup>
	160	190	1.0 10 <sup>-5</sup>	7.3 10 <sup>6</sup>
Etesienklima Es I „Mailand“ II „Rom“	190	210	1.0 10 <sup>-5</sup>	6.5 10 <sup>6</sup>
	380	260	1.7 10 <sup>-5</sup>	4.2 10 <sup>6</sup>

### 6.10 Pfad: Viehtränke

Der tägliche Wasserbedarf unter den verschiedenen Szenarien ist in Tabelle 6.29 zusammengefasst. Die Zahlen wurden in Abschnitt 4 abgeleitet.

**Tab. 6.29** Täglicher Wasserbedarf von Rentieren und Rindern (l/d)

Klima	Rentiere	Rinder
Tundra ET (aus dem Vorfluter zu decken)	2	
Feuchtwinterkaltes Klima Df Wintertrockenes Klima Dw Feuchtgemäßigtes Klima Cf		75
Etesienklima Es		100

### 6.11 Pfad: orale Aufnahme von Erde

Die direkte Aufnahme von Erde erfolgt in zwei verschiedenen Situationen. Bei der Arbeit in belasteten Gebieten werden die Finger schmutzig, wodurch Erde in den Mund gelangen kann; außerdem kann beim Verzehr von rohem Obst und Gemüse auch Erde aufgenommen werden.

Auf dem erstgenannten Weg nimmt ein Mensch stündlich  $6 \cdot 10^{-6}$  kg Erde auf /BMU 99/; die Aufenthaltsdauer in den verschiedenen Umgebungen geht aus Tabelle 6.3

hervor. So ergeben sich jährliche Verzehraten von etwa 5 bis 10 g in den verschiedenen Szenarien. Bei dem zweiten Weg ist die Verunreinigung der zubereiteten Nahrung von Bedeutung; die in Tabelle 6.30 aufgeführten Werte stellen erste Annahmen dar. Die jährlichen Verzehraten für pflanzliche Nahrungsmittel sind in Tabelle 6.1 zusammenfasst. Je nach Nahrungskorb ergeben sich auf diese Weise jährliche Verzehraten von unter 100 bis über 300 g.

**Tab. 6.30** Verschmutzung zubereiteter Nahrung mit Erde (Anteile)

Nahrungsmittel	Anteil Erde
Beeren (aus Überschwemmungsgebiet)	$2 \cdot 10^{-4}$
Pilze (aus Überschwemmungsgebiet)	0.005
Wurzelgemüse	$2 \cdot 10^{-5}$
Obst, Fruchtgemüse aus Freiland	$2 \cdot 10^{-4}$
Obst, Fruchtgemüse aus Treibhaus	$2 \cdot 10^{-5}$
Blattgemüse aus Freiland	$5 \cdot 10^{-4}$
Blattgemüse aus Treibhaus	$5 \cdot 10^{-5}$
Getreide	$2 \cdot 10^{-4}$

## 6.12 Pfad: Inhalation von Staub bei der Feldarbeit

Grundlage bilden die Konzentration von Radionukliden in der Luft, die Atemrate und die Aufenthaltsdauer. Die Konzentration in der Luft beruht wiederum auf der Konzentration im Boden und dem Staubgehalt in der Luft.

Die Radionuklidkonzentration im Boden wird nach Abschnitt 6.7 berechnet. Dort sind in Tabelle 6.21 auch Angaben über den Staubgehalt in der Luft enthalten, aber dieser Staub stammt nicht vom Einflussbereich des Endlagers, sondern wurde über weitere Strecken transportiert. Gleichwohl hängt nicht nur die mittlere Staubkonzentration in der Luft vom Klima ab, sondern auch die Schwebstaubkonzentration während besonders Staub aufwirbelnder Arbeiten. Es wird pauschal davon ausgegangen, dass die Schwebstaubkonzentration während dieser Arbeiten 1000mal so hoch ist wie normalerweise. Die Schwebstaubkonzentration liegt somit zwischen  $10^{-5}$  und  $2 \cdot 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup>. Ein Vergleich mit historischen Werten für den Gesamtstaubgehalt an verschiedenen stark belasteten Stellen im Freien und in Industrieanlagen /KRI 74/ zeigt, dass die höchsten hier gewählten Staubkonzentrationen im Bereich der in der Umgebung von Zementfabriken beobachteten Staubkonzentration liegen. Auf Grund der sehr groben Ableitung der Schwebstaubkonzentration in der Luft wird auf eine Zuordnung der Ra-

dionuklide zu den Bodenbestandteilen mit unterschiedlicher Korngröße, wie es in /BMU 99/ empfohlen wird, verzichtet.

Die Aufenthaltsdauer auf dem Acker geht aus Tabelle 6.3 hervor. Die oben angegebene erhöhte Staubkonzentration besteht jedoch nur während der besonders staubbelasteten Arbeitsvorgänge. Diese Zeit wird ermittelt aus der Größe der zu bearbeitenden Fläche und dem Arbeitsaufwand pro Fläche. Nach /RUH 85/ braucht ein Bauer ungefähr 3 bis 10 Stunden, um 1 ha Ackerland zu pflügen und zu eggen, je nach Ausrüstung und Parzellengröße. Die Größe der Felder, die zur Versorgung von 20 Menschen nötig sind, wurde in Abschnitt 4 festgestellt. In Tabelle 6.31 wird die berechnete Arbeitszeit angegeben, wobei unterstellt wird, dass ein Bauer die ganze Fläche allein bewirtschaftet, und jeweils zweimal jährlich pflügt und eggt. Auf Grund der geringen Parzellengröße wird angenommen, dass seine Geräte wenig leistungsfähig sind. Die Atemrate bei der Arbeit beträgt nach /BMU 99/ 1.2 m<sup>3</sup>/h.

**Tab. 6.31** Jährlicher Arbeitsaufwand zum Pflügen und Eggen

Klima	h/a
Df	23
Dw	28
Cf	30
Es	14

Diese Zahlen gelten jeweils für den größten unter den jeweiligen Klimabedingungen unterstellten Bedarf an Ackerfläche.

### 6.13 Pfad: Inhalation von Wasserdampf

Für diesen Pfad wird eine obere Abschätzung gegeben. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Treibhaus wird auf 75 % geschätzt, wenn regelmäßig gelüftet wird; bei einer Lufttemperatur von 20 °C entspricht dies einem Wassergehalt von 15 g/m<sup>3</sup> Luft /ROE 94/. Der Wassergehalt von 15 g/m<sup>3</sup> setzt sich aus drei Quellen zusammen: Brunnenwasser, das von der Sprinkleranlage verteilt wird, Wasser, das von den Pflanzen transpiriert wird, und Wasser, das vom Boden evaporiert wird. Es wird angenommen, dass die Luftfeuchtigkeit zur Hälfte direkt durch die Beregnung entsteht und zur anderen Hälfte durch die Transpiration der Pflanzen, während die Evaporation nur in vernachlässigbarem Maße beiträgt. Das transpirierte Wasser enthält keine Radio-

nuklide außer C 14, Sn 126 und I 129, denn Pflanzenblätter geben diese Elemente in die Luft ab /COU 85/. In Ermangelung genauer Kenntnisse wird angenommen, dass die Konzentration von Sn 126 und J 129 in der Luftfeuchtigkeit derjenigen im Beregnungswasser entspricht.

Bei einem unterstellten Beregnungsbedarf von 350 bis 550 l/Jahr wird die einzelne Pflanze zwar nur 175 bis 275 Stunden im Jahr beregnet, doch wird davon ausgegangen, dass die Sprinkleranlage täglich eingesetzt wird, so dass immer eine hohe Luftfeuchtigkeit im Treibhaus herrscht. Die in Tabelle 6.3 festgelegten Werte für die Aufenthaltsdauer im Treibhaus treffen daher auch hier zu; die Atemrate von Beschäftigten beträgt 1.2 m<sup>3</sup>/h /BMU 99/.

#### 6.14 Pfad: externe Strahlenexposition

Die zur Berechnung der Strahlenexposition am Flussufer notwendigen Parameterwerte werden in der AVV /BMU 01/ angegeben, siehe Tabelle 6.32. Sie gelten auch für die Situation an einem Endlager.

**Tab. 6.32** Parameterwerte zur Berechnung der externen Strahlenexposition am Flussufer

		Parameterwert	Einheit
Uferfaktor zur Berücksichtigung der Geometrie	$F_u$	0.2	ohne
Dichte des Sediments (Trockenmasse)	$\rho_{Se}$	700	kg/m <sup>3</sup>
Sedimentationsgeschwindigkeit	$v_{Se}$	$2.1 \cdot 10^{-10}$	m/s
Sedimentationszeit, bis 0.05 m Sedimentschicht erreicht sind	$T_{Se}$	$2.4 \cdot 10^8$	s
Konzentrationsfaktor für Sedimente	$K_F^r$		l/kg
Tc, Te, Ra, Nb		100	
Cs, I, Lanthaniden		10000	
Co, Ni, Zr, Aktiniden		30000	

Die Konzentration im Boden  $C_r^{Üboden}$  des Überschwemmungsgebietes wird nach den Angaben in Abschnitt 6.4 berechnet. Die übrigen zur Berechnung der Strahlenexposition im Überschwemmungsgebiet notwendigen Parameterwerte werden in der AVV /BMU 01/ angegeben, siehe Tabelle 6.33. Sie gelten ohne Anpassung auch in der Situation an einem Endlager.

**Tab. 6.33** Parameterwerte zur Berechnung der externen Strahlenexposition im Überschwemmungsgebiet

		Parameterwert	Einheit
Uferfaktor zur Berücksichtigung der Geometrie	$f_u^{\text{Substrat}}$	1	ohne
Schichtdicke des durchwurzelter Sediments	$U^{\text{Boden}}$	0.1	m
Effektive Schichtdicke	$U_r$	0.05	m
Flächentrockenmasse des Bodens im Überschwemmungsgebiet	$p^m$	120	kg/m <sup>2</sup>

Für die Berechnung der externen Strahlenexposition auf berechneten Weiden und Feldern ist die Kenntnis der Radionuklidkonzentration im Boden notwendig; sie wurde in Abschnitt 6.7 bestimmt. Die Schichtdicke des Bodens und die Flächentrockenmasse gehen aus Tabelle 6.20 hervor, der Geometriefaktor  $f_u^{\text{Substrat=Weiden,Felder}}$  beträgt auch hier 1.

Nach derselben Methode wird auch die externe Strahlenexposition im Treibhaus berechnet. Die Konzentration im Boden wurde in Abschnitt 6.8 ermittelt. Anders als sonst üblich befindet sich der Boden nicht nur in Höhe der Fußsohlen sondern reicht teilweise bis in Brusthöhe. Darum wird empfohlen, die Dosisfaktoren  $g_{b,r,t}$  pauschal mit dem Faktor 1.5 zu korrigieren. Als Geometriefaktor wird pauschal  $f_u^{\text{Substrat=Treibhausboden}} = 1$  angenommen.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Modellrechnungen

Zur Bewertung der Relevanz der verschiedenen Klima-Szenarien werden Modellrechnungen mit einem eigens entwickelten EXCEL-Code durchgeführt. Die Eingangsgröße für die Berechnungen wird dabei auf zwei verschiedene Weisen festgelegt:

- Das Brunnenwasser wird als Teil der Geosphäre aufgefasst. Dann ist die Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser konstant und beträgt 1 Bq/l. Die jährliche Freisetzung in die Biosphäre hängt somit von der Entnahme aus dem Brunnen ab.
- Das Brunnenwasser wird als Teil der Biosphäre aufgefasst. Dann ist die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre konstant (1 Bq/a). Die Radionuklidkonzentration im entnommenen Brunnenwasser hängt demgegenüber von der Entnahmemenge ab.

Die Rechnungen werden durchgeführt für insgesamt 56 Radionuklide, davon 17 Einzelnuclide und 36 Glieder der vier Zerfallsreihen. Damit sind die meisten für Endlager relevanten Radionuklide erfasst, nur C 14 wird auf Grund seines besonderen Stoffwechsels nicht berücksichtigt. Zusätzlich werden die drei kurzlebigen Radionuklide Co 60, Sr 90 und Cs 137 aufgenommen, da ihre Radioökologie gut bekannt ist.

Die Modellrechnungen werden nach einem vereinfachten Verfahren durchgeführt. Die Vereinfachung besteht darin, dass bei den Radionukliden der Zerfallsreihen die Beiträge der Tochternuklide zur externen  $\gamma$ -Strahlung pauschal durch die Wahl der Dosisfaktoren berücksichtigt werden und der Beitrag zur internen Strahlenexposition durch Aufbau von Radionukliden im Boden vernachlässigt wird. Im Ergebnis führt dies zu einer Unterschätzung der Dosis unter den Bedingungen des Etesienklimas (Es) und des kontinental geprägten feuchtgemäßigten Klima (Cf III „Prag“).

Für jedes Freisetzungsmodell wird die Höhe der Strahlenexposition unter fünf unterschiedlichen Klimabedingungen mit ihren Varianten und für verschiedene Nahrungskörbe berechnet. So ergeben sich jeweils 24 unterschiedliche Fälle, für die jeweils zwei Rechnungen durchgeführt werden, die sich im Modell für die Kontamination der Pflanzen unterscheiden: Im ersten Modell werden - wie in der AVV /BMU 01/ - alle

Pflanzen morphologisch wie Blattgemüse angesehen, im zweiten werden sie nach ihrer Morphologie unterschiedlich behandelt. Insgesamt werden somit 96 Modellrechnungen für jedes Radionuklid durchgeführt. Der Übersichtlichkeit halber werden hier nicht sämtliche Ergebnisse dargestellt sondern die Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede herausgearbeitet.

## **7.2 Ergebnisse**

### **7.2.1 Freisetzungsterm als Einheitskonzentration im Brunnenwasser**

#### **7.2.1.1 Einheitliche Morphologie aller Pflanzen**

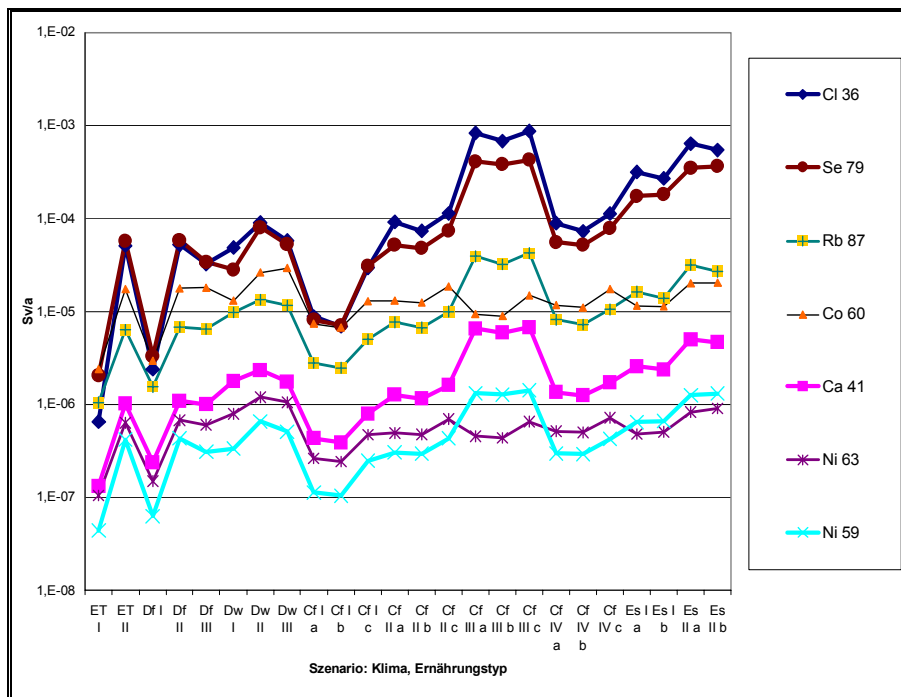
Es wird konservativ davon ausgegangen, dass eine Beregnung von Feldern und Weiden dann erfolgt, wenn ein Defizit in der Feuchtigkeitsbilanz besteht, wobei wirtschaftliche Erwägungen nicht berücksichtigt werden.

In Abbildung 7.1a bis 7.1c wird die Gesamthöhe der durch die Freisetzung der Einzelnuclide verursachten Strahlenexposition unter den verschiedenen Umweltbedingungen dargestellt, die Abbildungen 7.2 bis 7.5 zeigen die vier Zerfallsreihen.

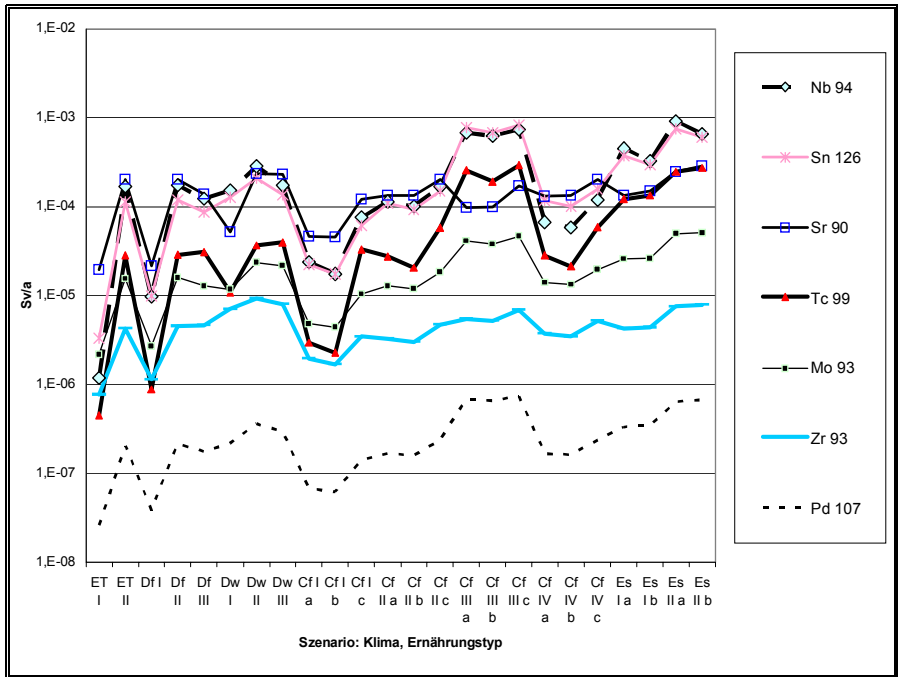
Bei diesen Diagrammen geht es nicht um die absolute Höhe der Strahlenexposition, sondern um die Wirkung der einzelnen Szenarien auf die Höhe der Strahlenexposition. Die absolute Höhe wäre leichter in Form von Tabellen darstellbar; die Graphiken erlauben dagegen eine schnelle Aussage darüber, unter welchen Randbedingungen mit besonders hohen oder niedrigen Strahlenexpositionen gerechnet werden kann, und sie geben auch einen Eindruck von der Höhe der Unterschiede. Außerdem wird vermittelt, ob es Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Radionukliden hinsichtlich der Reaktion auf die Bedingungen der verschiedenen Szenarien gibt.



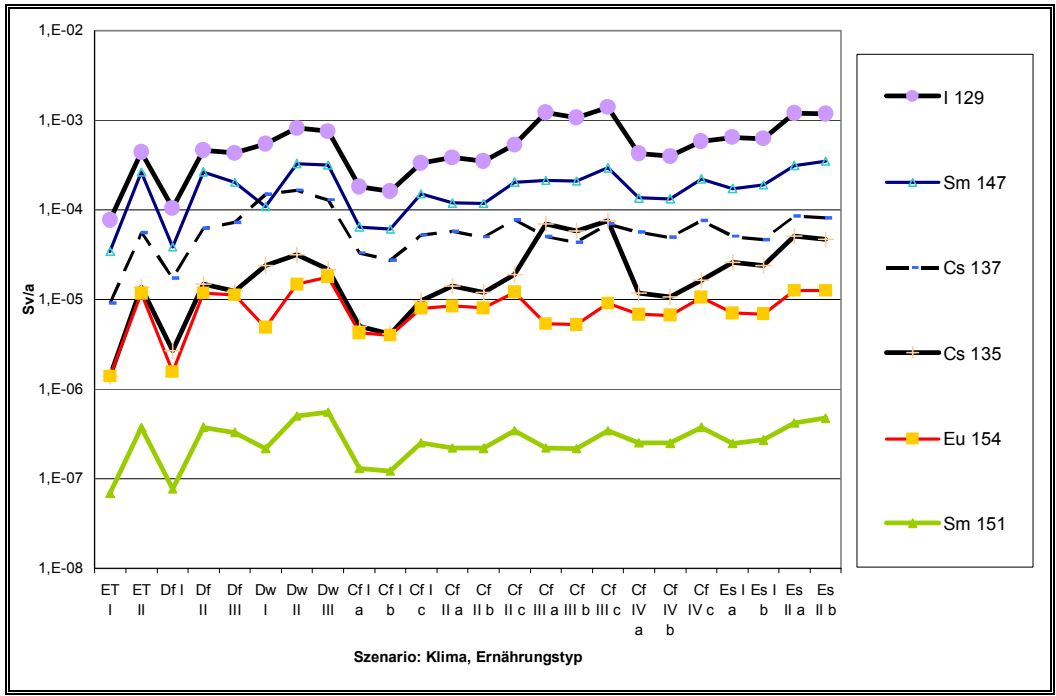
**Abb. 7.1a** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Einzelnuclide, Teil 1



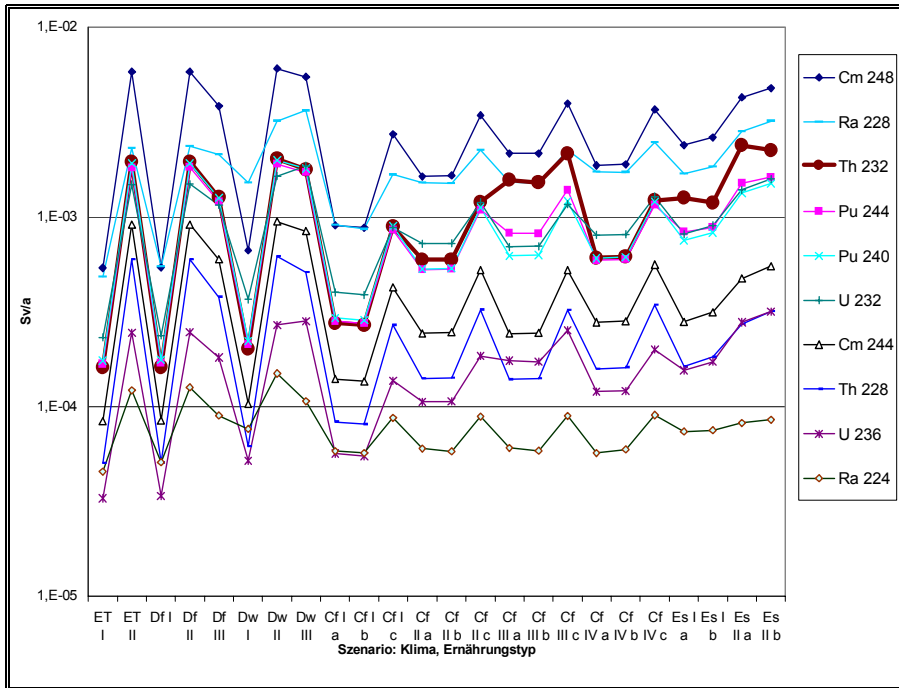
**Abb. 7.1b** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Einzelnuclide, Teil 2



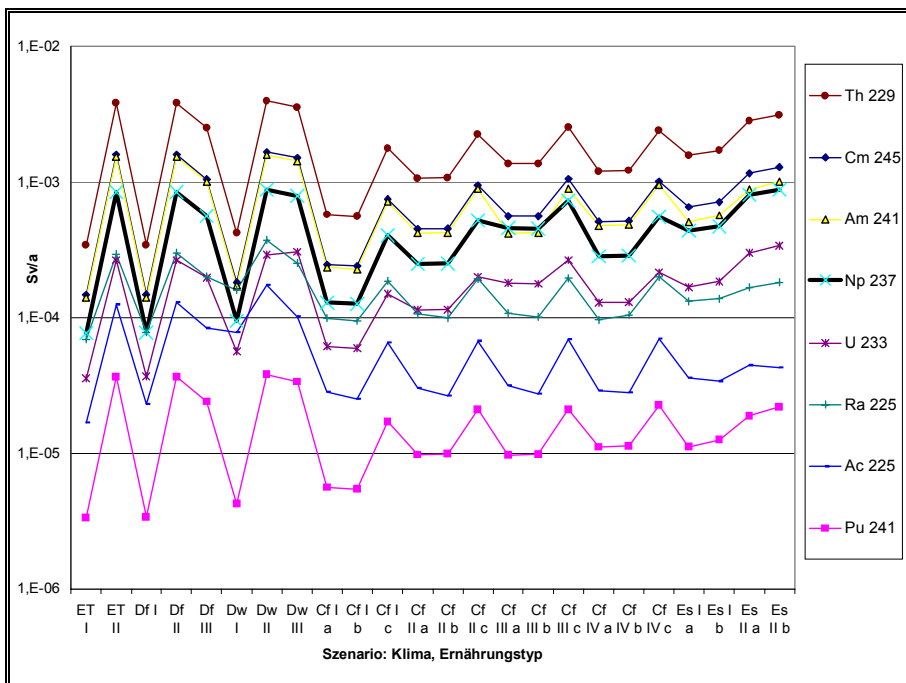
**Abb. 7.1c** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Einzelnuklide, Teil 3



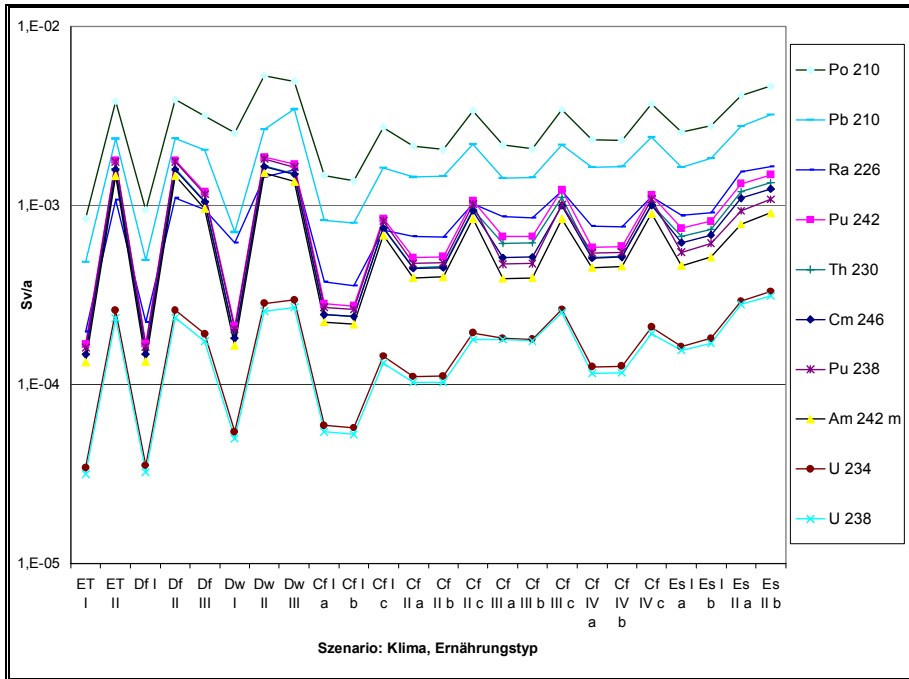
**Abb. 7.2** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Thorium-Reihe



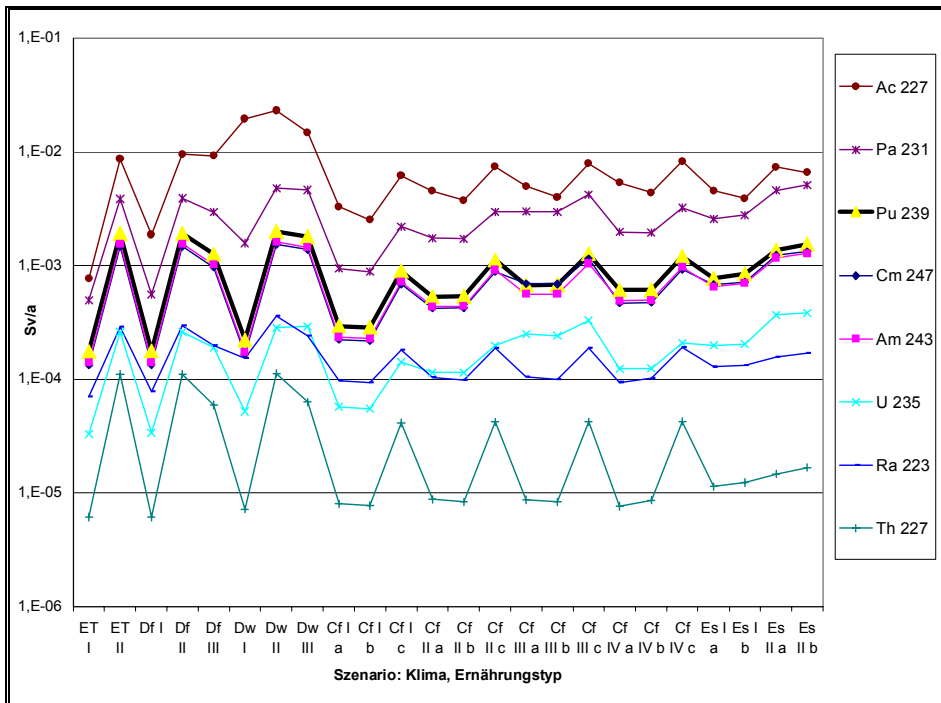
**Abb. 7.3** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Neptunium-Reihe



**Abb. 7.4** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Uran-Radium-Reihe



**Abb. 7.5** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Actinium-Reihe



Eine vergleichende Betrachtung der Abbildungen 7.1 bis 7.5 zeigt im Wesentlichen zwei Charakteristika:

1. Der Einfluss der unterschiedlichen Klimabedingungen auf die Gesamtbelastung ist vergleichsweise gering. Die Unterschiede zwischen den günstigsten und den ungünstigsten Bedingungen betragen nur ein bis zwei Größenordnungen.
2. Die Radionuklide lassen sich hinsichtlich des Einflusses der unterschiedlichen Klimabedingungen zu großen Gruppen zusammenfassen: 1.) Radionuklide mit hohem Dosisfaktor für Inhalation, das sind die meisten Glieder der Zerfallsketten und einige Einzelnuclide, und 2.) Radionuklide, die von Pflanzen und Tieren besonders gut aufgenommen werden; hierzu gehören die meisten Einzelnuclide. 3.) kurzlebige Einzelnuclide, 4.) kurzlebige Glieder der Zerfallsketten.

Das warme sommertrockene Etesienklima (Es) bringt bei vielen Einzelnucliden die höchsten Dosen mit sich. Dies beruht auf der hohen Beregnungsrate. Im Klima Cf III ist die Beregnung nur halb so hoch, aber auch dieses Klima führt zu besonders hohen Dosen, da sich die Radionuklide im hier typischen Schwarzerdeboden besser anreichern als in den anderen Böden. Daher ist dieses Klima prädestiniert für hohe Dosen durch langlebige Radionuklide mit hohem Transfer in Pflanzen, durch langlebige Radionuklide mit hoher  $\gamma$ -Strahlung und außerdem durch die Glieder der Ketten, wenn sie selbst oder ihre Tochterprodukte sich durch hohen Transfer in Pflanzen oder hohe  $\gamma$ -Strahlung auszeichnen.

Für Radionuklide mit hohen Inhalationsdosisfaktoren ergeben sich Spitzenbelastungen im Etesienklima und in allen Szenarien mit Treibhäusern, wie die Spitzen in den Abbildungen 7.2 bis 7.5 belegen. Im Etesienklima erfolgt die Dosisbelastung durch Inhalation von resuspendiertem Material, im Treibhaus durch Wasserdampf. Bei der Inhalationsbelastung im Treibhaus spielen Tochterprodukte keine Rolle, wohl aber bei der Inhalation von resuspendierten Bodenpartikeln im Freien.

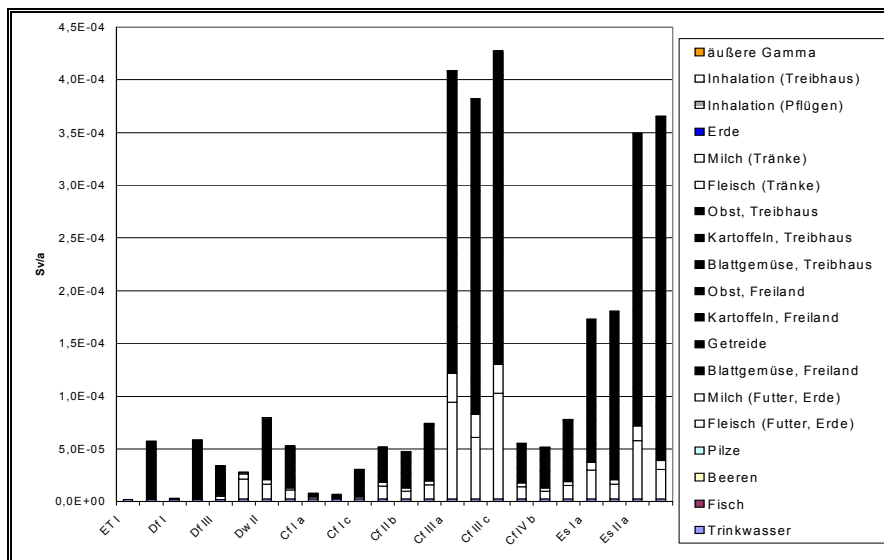
Die Gesamthöhe der Strahlenexposition ist gegenüber Klimaeinflüssen zwar recht robust, aber die prozentualen Beiträge der einzelnen Pfade zur Strahlenexposition unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Klimaszenario und vom Radionuklid. Einige typische Beispiele für die Zusammensetzung der Strahlenexposition nach Expositionspfaden werden im Folgenden gezeigt. In diesen Abbildungen ist die Strahlenexposition über Milch und Fleisch schwarz, über beregnete pflanzliche Nahrungsmittel weiß, unabhängig davon, ob die Pflanzen im Treibhaus oder Freiland gezogen wurden. Die Exposition über die anderen Expositionspfade ist in Graustufen erkennbar.

Beispiele für Radionuklide mit hoher Bedeutung der Bedingungen des Etesienklimas und des Klimas Cf III sind Se 79 (Abbildung 7.6), Nb 94 (Abbildung 7.7), Tc 99 (Abbildung 7.8), I 129 (Abbildung 7.9), und Cs 135 (Abbildung 7.10). Cs 137 (Abbildung 7.11) wird auf Grund seiner kurzen Halbwertszeit nicht in wesentlichen Mengen aus einem Endlager freigesetzt; es wird hier nur auf Grund der deutlichen Unterschiede zu Cs 135 gezeigt. Während die meisten genannten Radionuklide zu einer Dosis durch Ingestion führen, wirkt Nb 94 auf Grund seiner  $\gamma$ -Strahlung.

Bei keinem der genannten Radionuklide spielt die Aufnahme von Trinkwasser eine bedeutende Rolle. Im Szenario mit der jeweils maximalen Dosis trägt Trinkwasser mit jeweils 0.2 bis 6.3 % zur Gesamtdosis bei.

Es schließen sich drei Vertreter mit hohen Dosisfaktoren für Inhalation an: Pu 239 (Abbildung 7.12), Am 241 (Abbildung 7.13) und Cm 247 (Abbildung 7.14). In den Treibhaus-Szenarien wird die Dosis des Etesienklimas erreicht oder übertroffen. Bei diesen Radionukliden liefert Trinkwasser etwa 10 % der Dosis im Szenario mit der höchsten Belastung.

**Abb. 7.6** Strahlenexposition durch Se 79 in Brunnenwasser (1 Bq/l)



**Abb. 7.7** Strahlenexposition durch Nb 94 in Brunnenwasser (1 Bq/l)

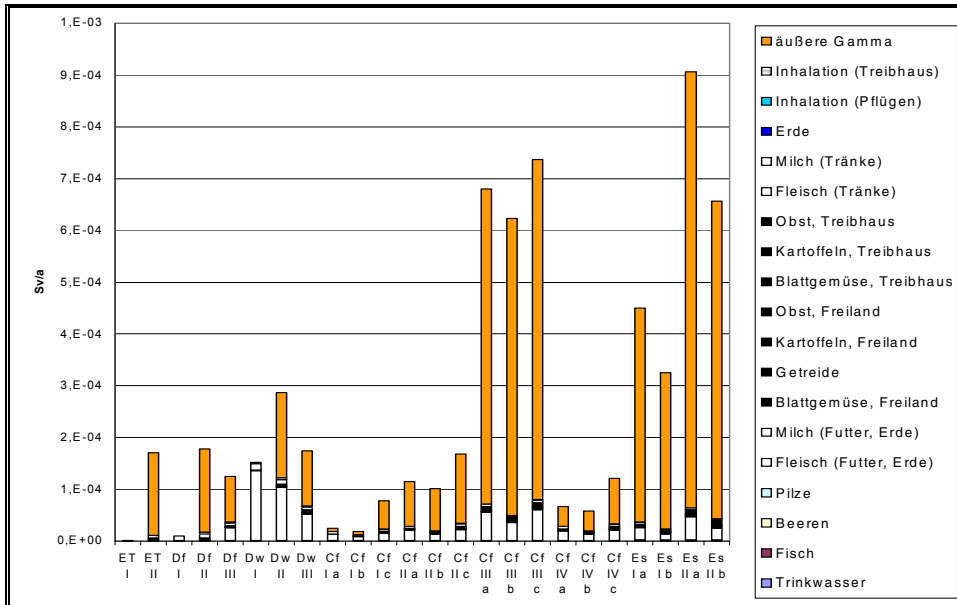


Abb. 7.8 Strahlenexposition durch Tc 99 in Brunnenwasser (1 Bq/l)

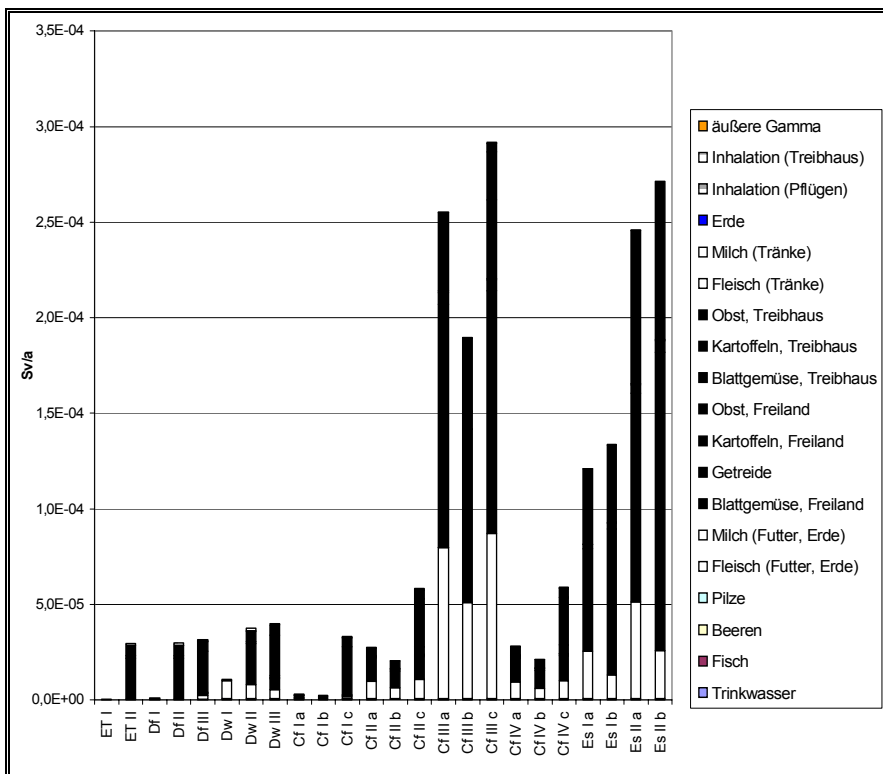
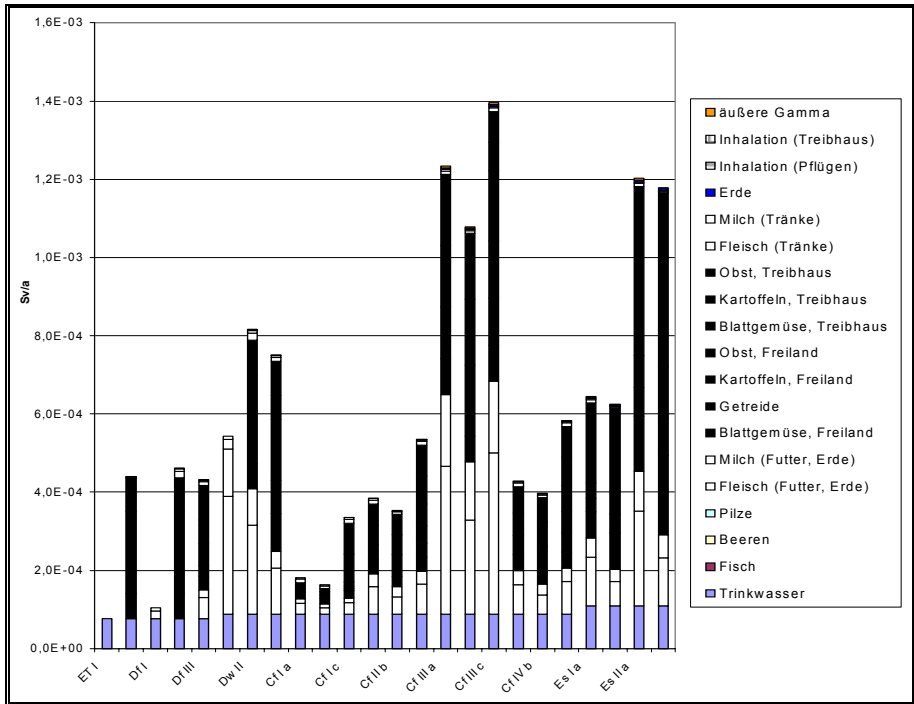
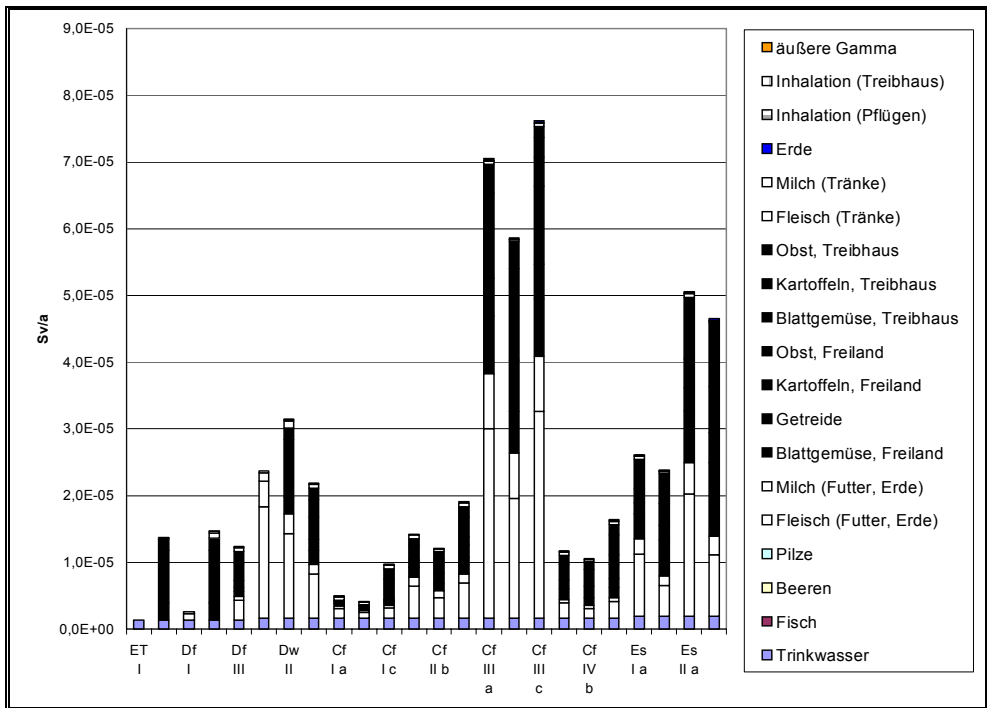


Abb. 7.9 Strahlenexposition durch I 129 in Brunnenwasser (1 Bq/l)



**Abb. 7.10** Strahlenexposition durch Cs135 in Brunnenwasser (1 Bq/l)



**Abb. 7.11** Strahlenexposition durch Cs137 in Brunnenwasser (1 Bq/l)



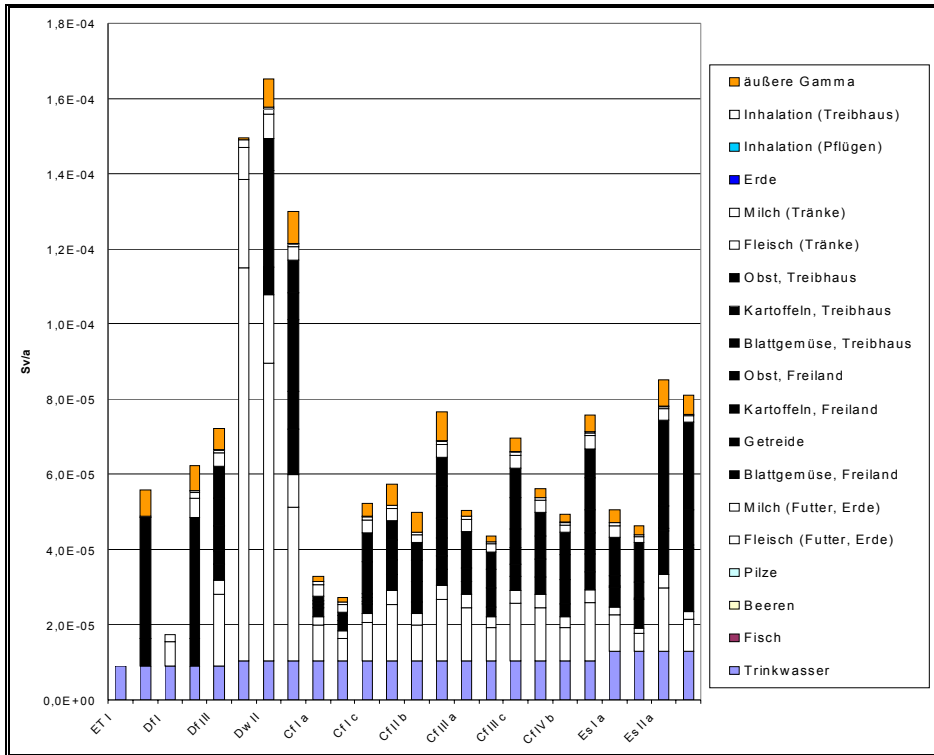


Abb. 7.12 Strahlenexposition durch Pu 239 in Brunnenwasser (1 Bq/l)

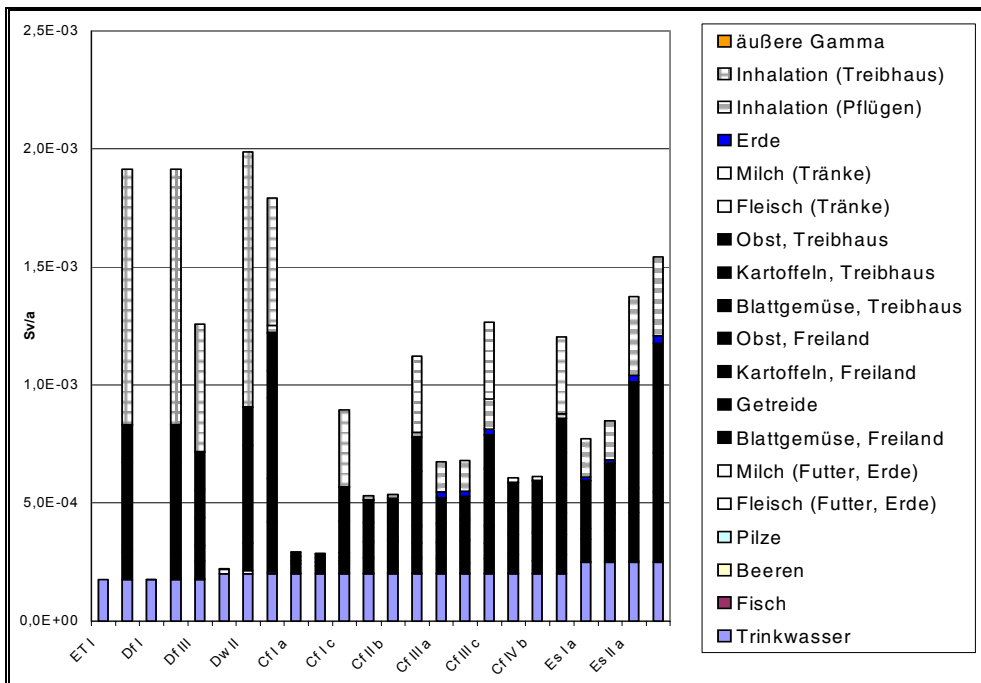


Abb. 7.13 Strahlenexposition durch Am 241 in Brunnenwasser (1 Bq/l)

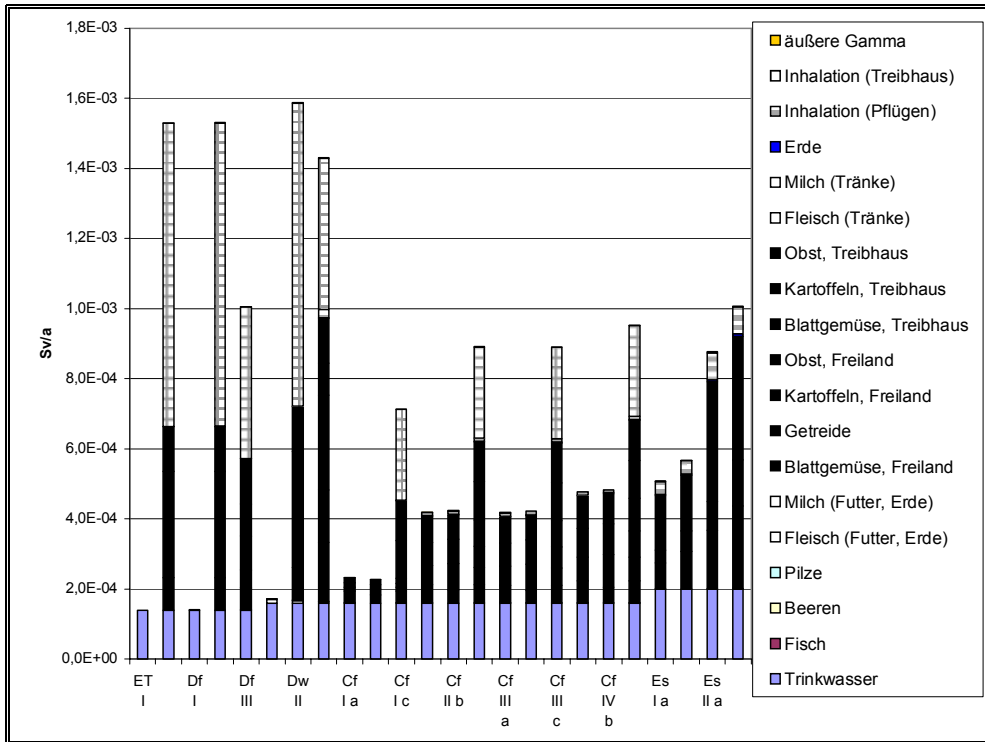
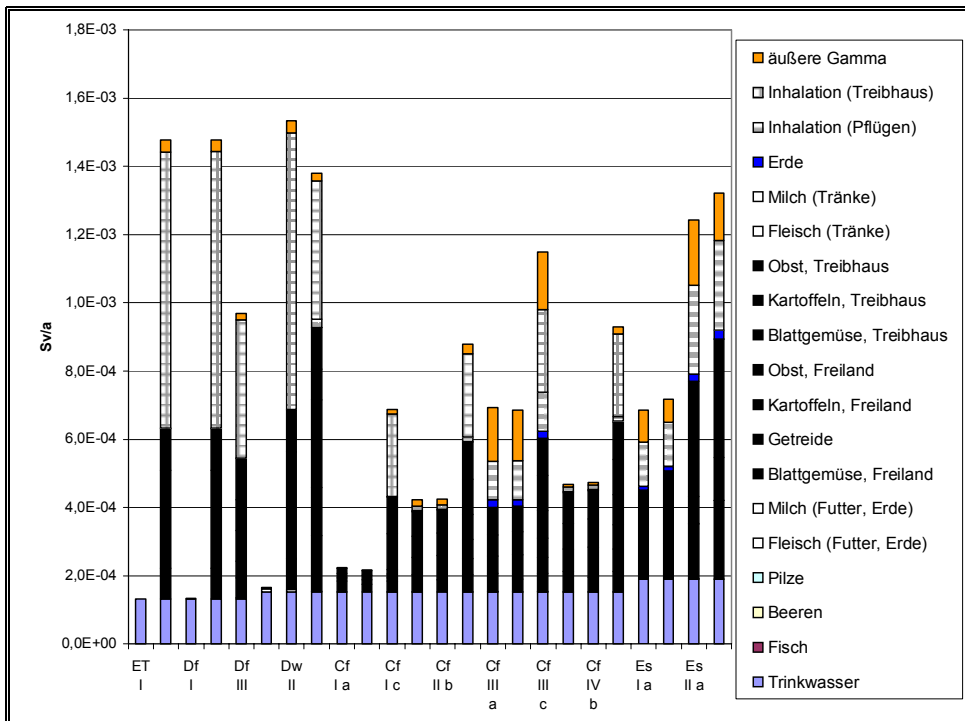


Abb. 7.14 Strahlenexposition durch Cm 247 in Brunnenwasser (1 Bq/l)



### 7.2.1.2 Berücksichtigung der unterschiedlichen Morphologie der Pflanzen

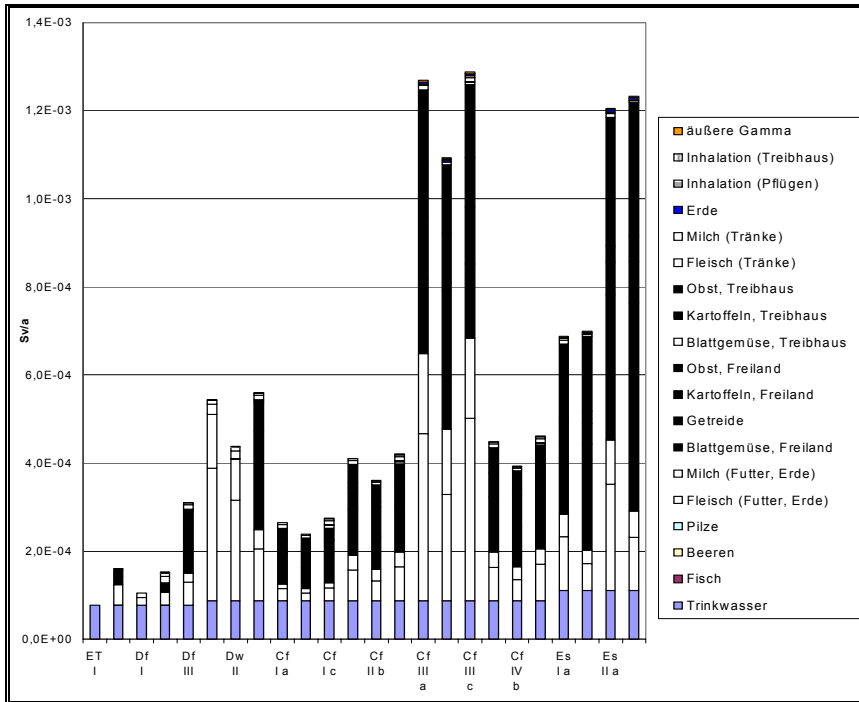
Durch Berücksichtigung der tatsächlichen Morphologie der Pflanzen verringert sich die berechnete Strahlenexposition. Dann beruht die Strahlenexposition durch Wurzelgemüse nur noch auf Radionukliden, die in die Knolle aufgenommen werden, die direkte externe Kontamination durch Kontakt mit dem Beregnungswasser entfällt. Für immobile Radionuklide wird der Pfad „Wurzelgemüse“ auf diese Weise völlig unbedeutend, beim leicht beweglichen I 129 nimmt die Strahlenexposition über diesen Pfad um eine Größenordnung ab.

Die Dosisbeiträge durch den Verzehr von Obst und Getreide reagieren nicht so empfindlich auf die Wahl des Modells, weil diese Feldfrüchte auch weiterhin einer externen Kontamination ausgesetzt sind. Die Strahlenexposition durch Radionuklide, die sich besonders leicht in den Pflanzen bewegen, kann nach diesem Modell in Einzelfällen sogar etwas höher als nach dem vereinfachten Modell sein.

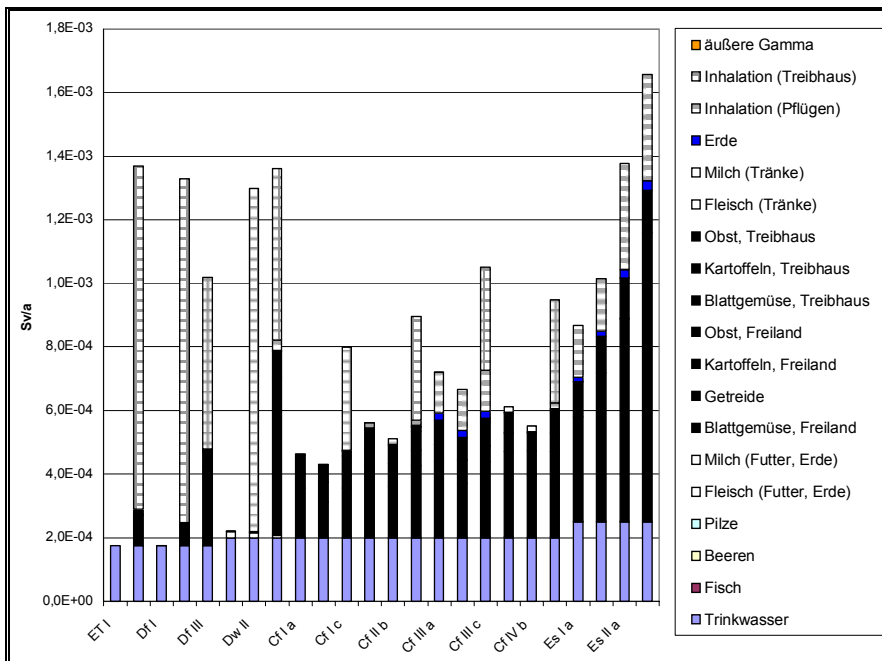
Die Auswirkung des Pflanzenmodells auf die Höhe der jeweils maximalen Strahlenexposition ist dennoch nur gering, da der Kartoffelverzehr eher in den kalten Szenarien üblich ist. Die relative Bedeutung der warmen Szenarien steigt also.

In den Abbildungen 7.15 und 7.16 werden zwei Radionuklide vorgestellt. Dabei ist I 129 repräsentativ für ein in Pflanzen leicht bewegliches Radionuklid und Pu 239 für ein immobiles Radionuklid. In beiden Fällen ist die maximale Strahlenexposition geringer, wenn die unterirdische Wachstumsweise der Kartoffelknollen berücksichtigt wird, aber der Unterschied zwischen den beiden Modellen beläuft sich im Fall von I 129 auf weniger als 10 % und bei Plutonium auf 20 %; dabei ändert sich die Lage des Maximums, denn unter Berücksichtigung der unterirdischen Wachstumsweise der Kartoffel wandert es im Falle von Pu 239 ins Szenario Es II b. Die Begründung für den vergleichsweise geringen Unterschied zwischen den beiden Modellen liegt unter anderem darin, dass die maximale Belastung in einem Szenario mit geringem Kartoffelverzehr auftritt, wenn ein adäquates Modell für die Berechnung der Radionuklidkonzentration in Pflanzen gewählt wird. – Die übrigen Radionuklide verhalten sich ähnlich wie die dargestellten.

**Abb. 7.15** Strahlenexposition durch I 129 in Brunnenwasser (1 Bq/l)  
Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie



**Abb. 7.16** Strahlenexposition durch Pu 239 in Brunnenwasser (1 Bq/l) Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie



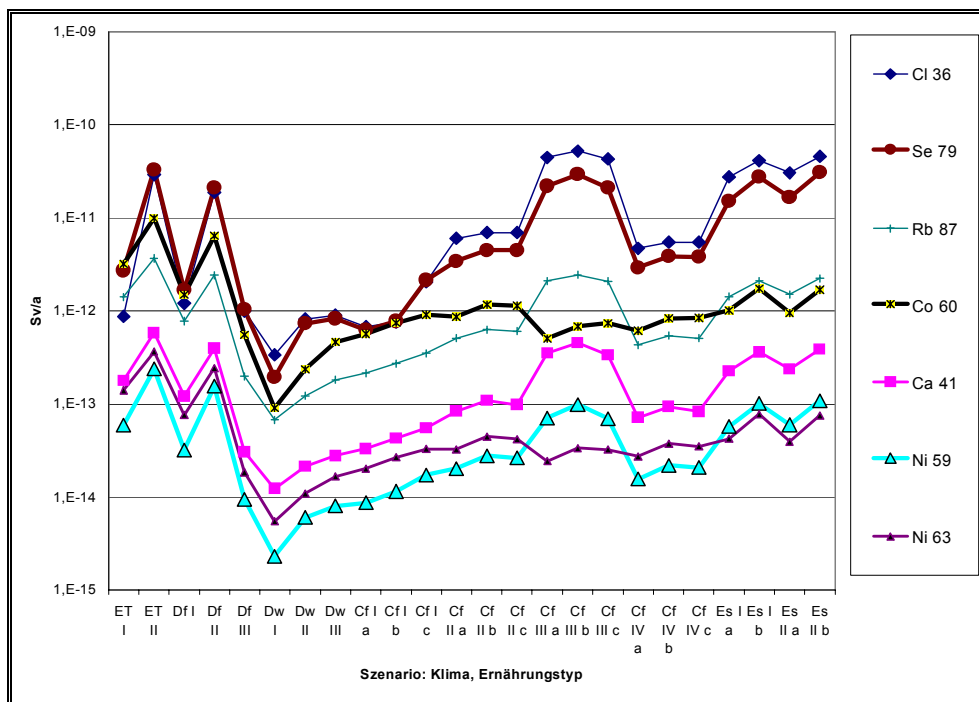
## 7.2.2 Sourcesterm als jährliche Freisetzung

### 7.2.2.1 Pflanzenzenmodell der AVV

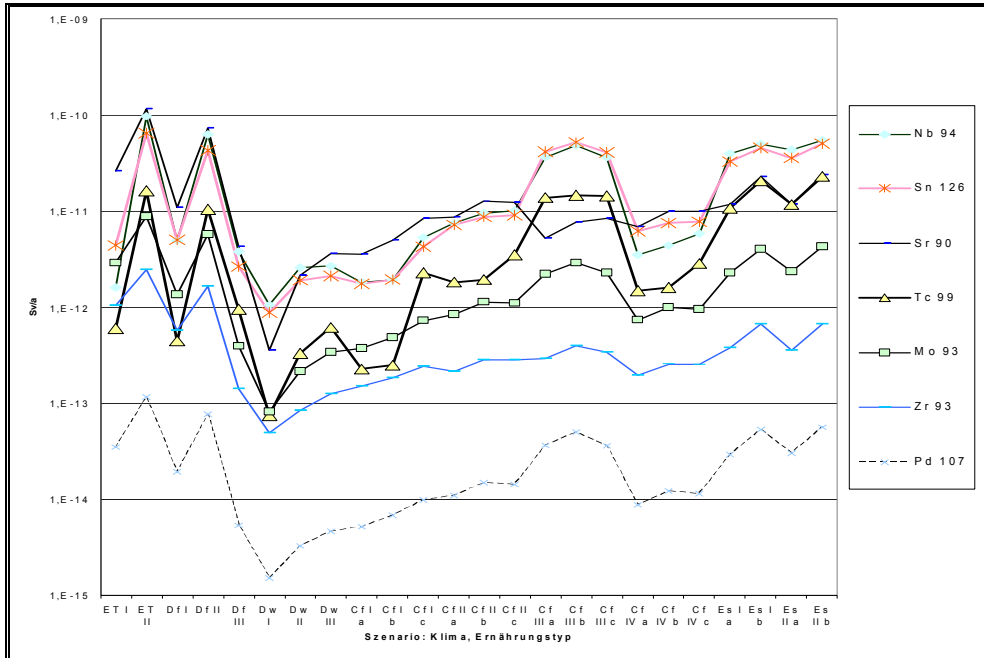
Manche ältere Programme für die Berechnung der Wanderung der Radionuklide durch die Geosphäre berechnen die jährliche Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre, die dann statt der Radionuklidkonzentration im Wasser als Eingangsgröße in radioökologische Berechnungen eingeht. Dann gehört der Brunnen zur Biosphäre, und die Radionuklidkonzentration im Wasser wird von der geförderten Wassermenge beeinflusst. In diesem Falle hat eine erhöhte Beregnungsintensität nicht unbedingt auch eine höhere Strahlenexposition zur Folge, solange die übrigen Parameterwerte konstant bleiben. Das sei im Folgenden exemplarisch belegt.

Die Abbildungen 7.17 bis 7.21 zeigen die Strahlenexposition über alle Expositionspfade, wobei das Modell der AVV für die Berechnung der Radionuklidkonzentration in Pflanzen zu Grunde gelegt wird.

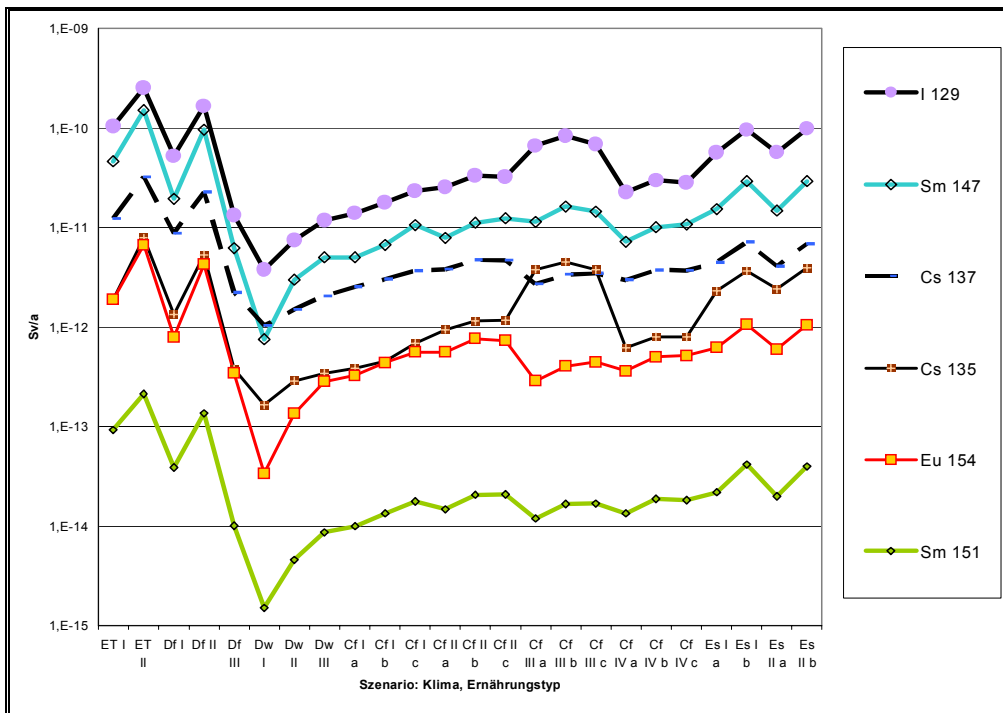
**Abb. 7.17a** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser: Einzelnuclide, Teil 1



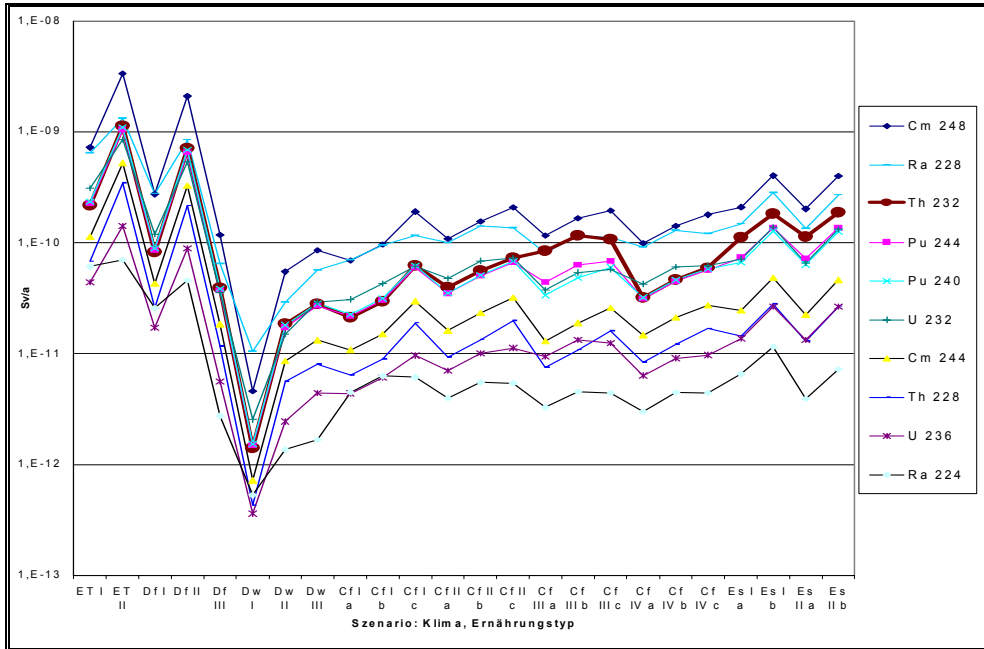
**Abb. 7.17b** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser:  
 Einzelnuklide, Teil 2



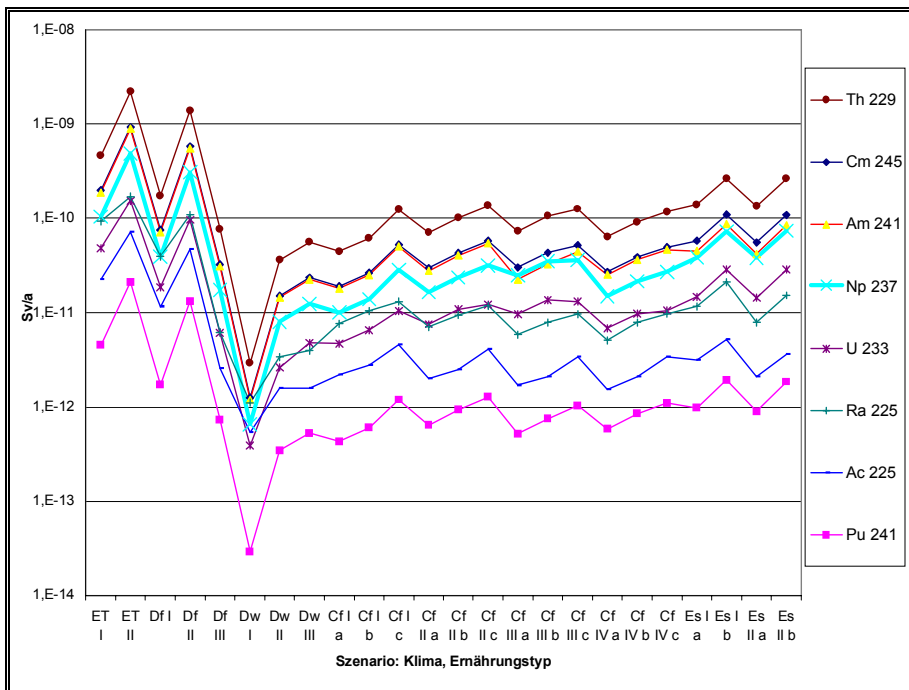
**Abb. 7.17c** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser:  
 Einzelnuklide, Teil 3



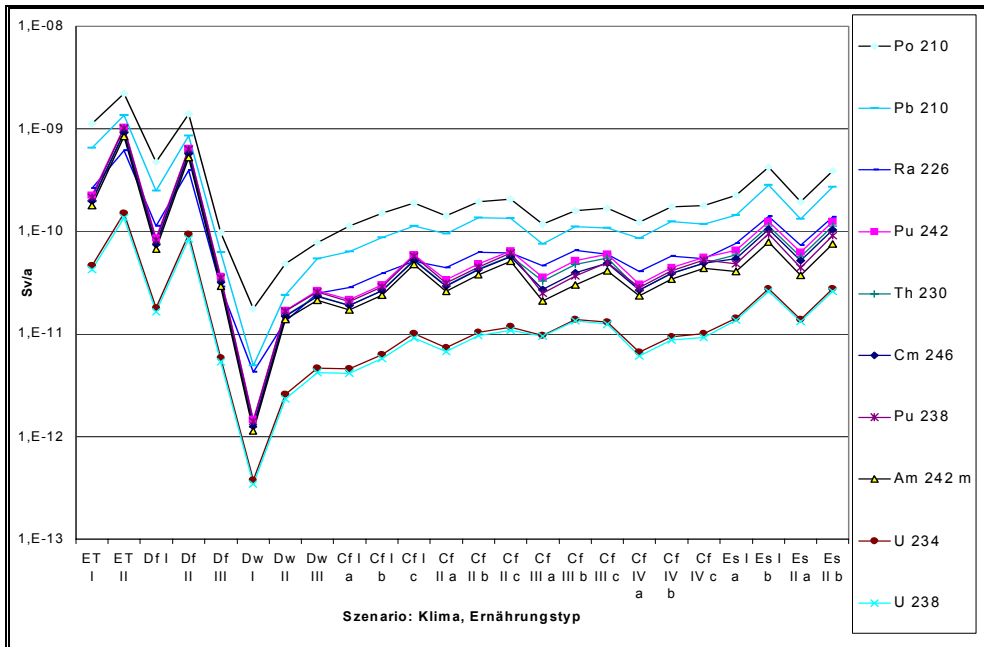
**Abb. 7.18** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Thorium-Reihe



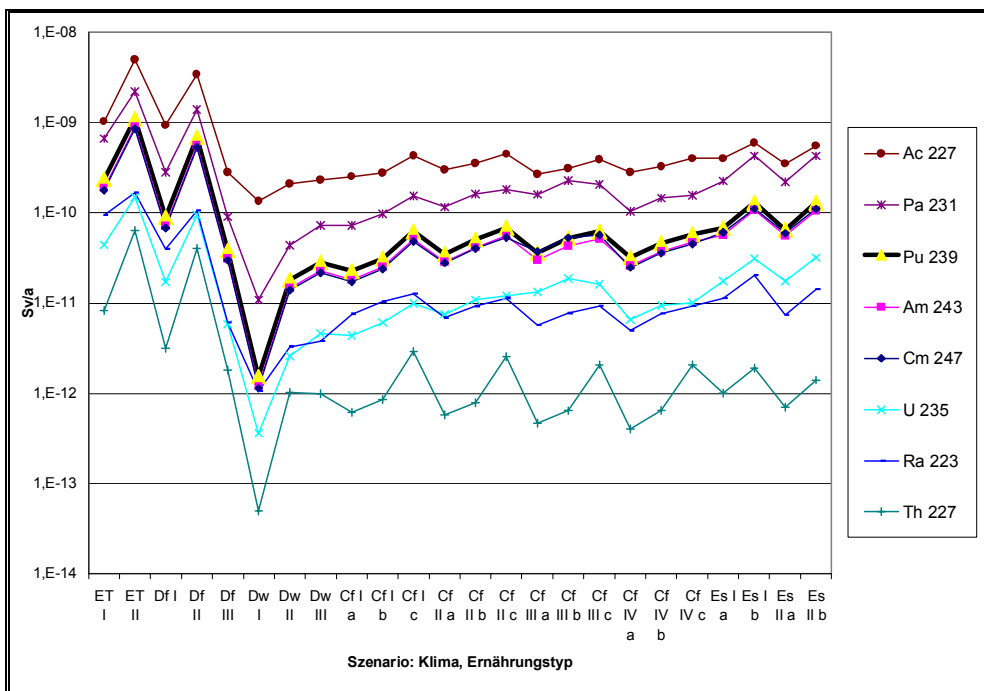
**Abb. 7.19** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Neptunium-Reihe



**Abb. 7.20** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Uran-Radium-Reihe



**Abb. 7.21** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Aktinium-Reihe





Die vorstehenden Abbildungen zeigen, dass sich auch in diesem Freisetzungsszenario die einzelnen Radionuklide recht gleichartig verhalten. Im Gegensatz zum ersten Szenarium, in dem der Brunnen Teil der Geosphäre ist, sind aber die höchsten Strahlenexpositionen in den kalten Szenarien mit Nutzung von Treibhäusern ET II und Df II zu erwarten. Das gilt hier auch für die meisten Einzelnuclide, wie die Abbildungen 7.22 bis 7.30 zeigen. Ausnahmen sind die Radionuklide, die am besten über die Wurzel in die essbaren Teile der Pflanzen aufgenommen werden, also z. B. Tc 99 und Cl 36.

Bei einigen Einzelnucliden (Se 79, Cs 135) beruht die relative Bedeutung der kalten Szenarien mit Treibhäusern nur auf dem konservativen Rechenmodell für die Radionuklidkonzentration in Kartoffeln, bei anderen wie I 129 und Cs 137 sind die kalten Klimabedingungen auch bei einer realistischeren Berechnung der Radionuklidkonzentration in Kartoffeln bestimmend für die mögliche Höhe der Dosis, aber der Abstand zur Dosis unter warmen trockenen Klimabedingungen sinkt. Zur dritten Gruppe, bei denen die Radionuklidkonzentration in Kartoffeln unwichtig ist, gehören der  $\gamma$ -Strahler Nb 94, Tc 99 mit seinem hohen Transferfaktor für Blattgemüse und Radionuklide mit besonders hohen Dosisfaktoren für Inhalation wie Pu 239, Am 241 und Cm 247.

**Abb. 7.22** Strahlenexposition durch Freisetzung von Se 79 (1 Bq/a)

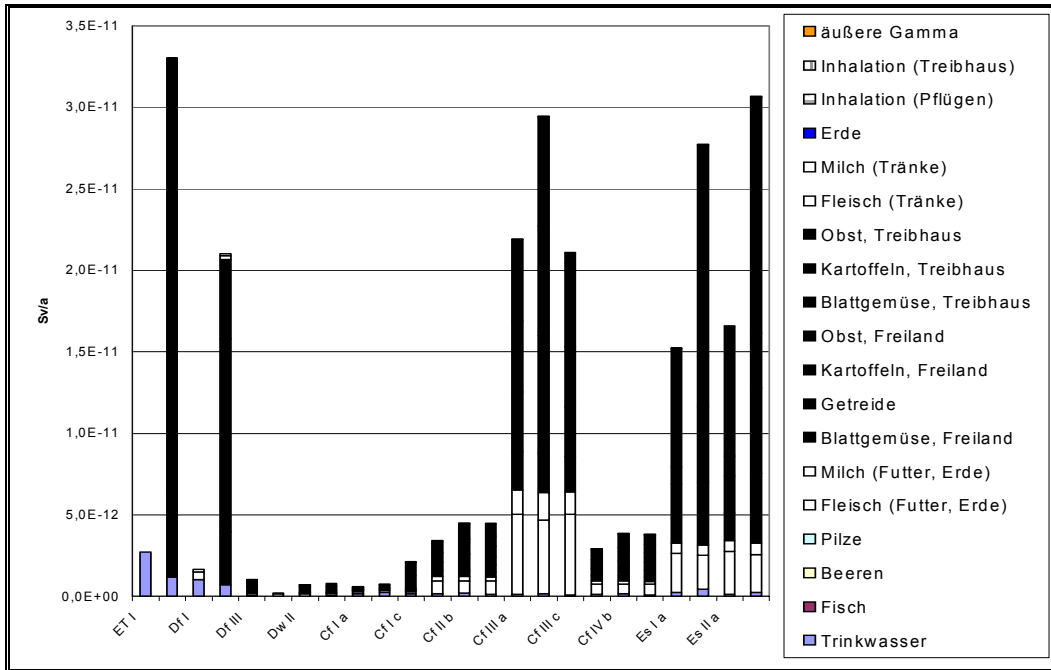


Abb. 7.23 Strahlenexposition durch Freisetzung von Nb 94 (1 Bq/a)

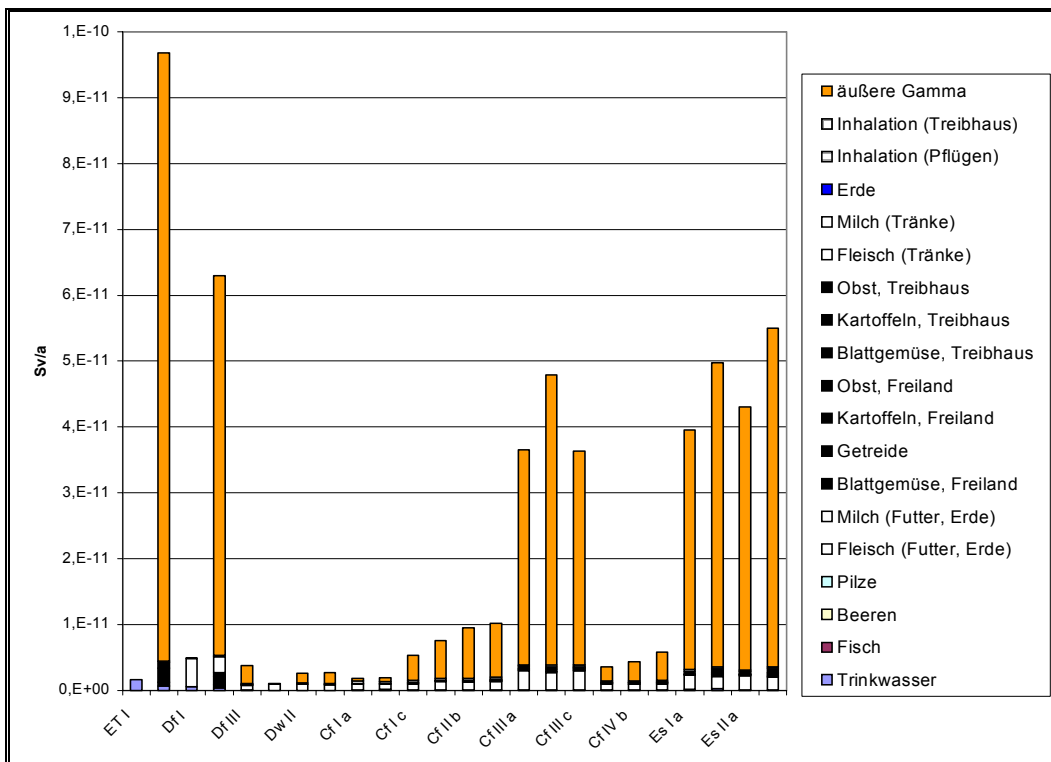


Abb. 7.24 Strahlenexposition durch Freisetzung von Tc 99 (1 Bq/a)

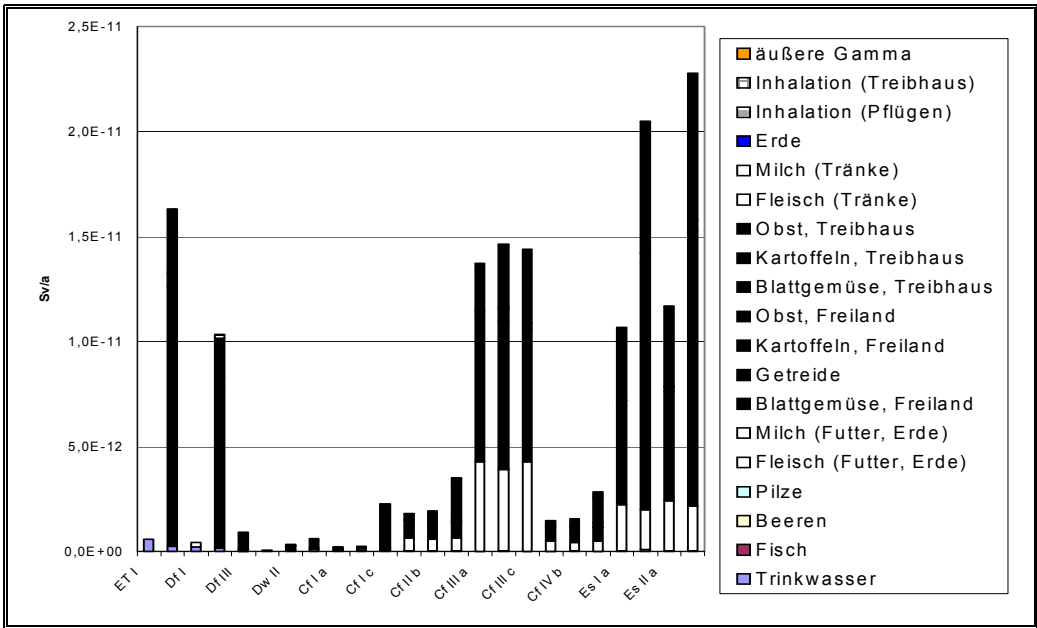


Abb. 7.25 Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/a)

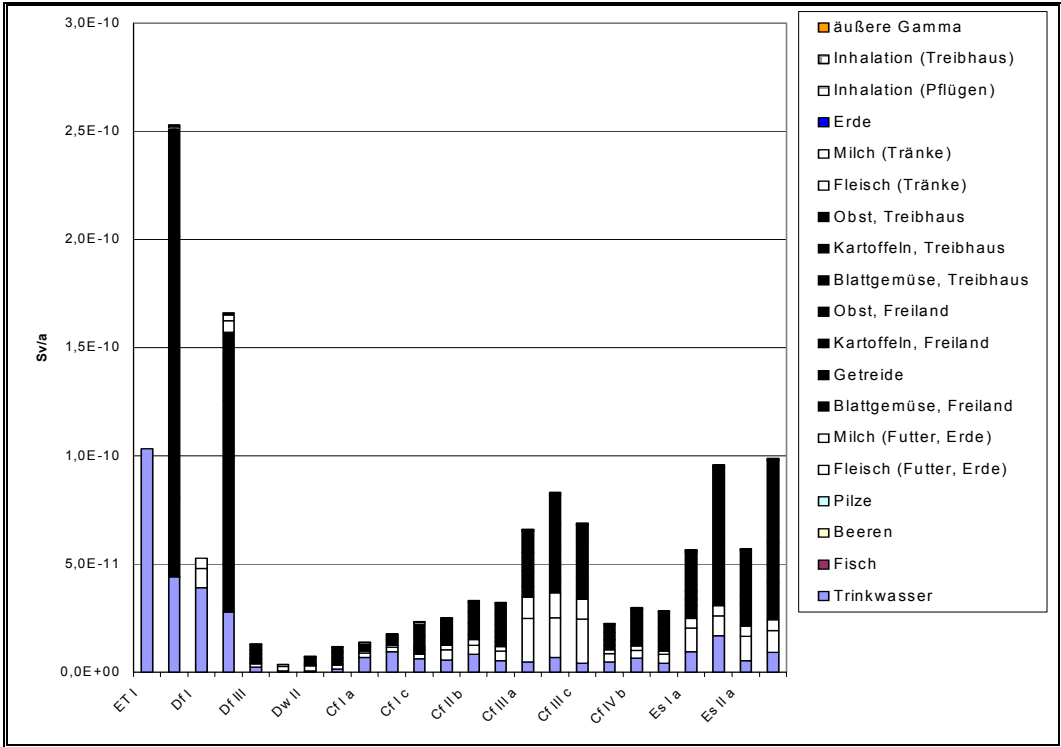


Abb. 7.26 Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 135 (1 Bq/a)

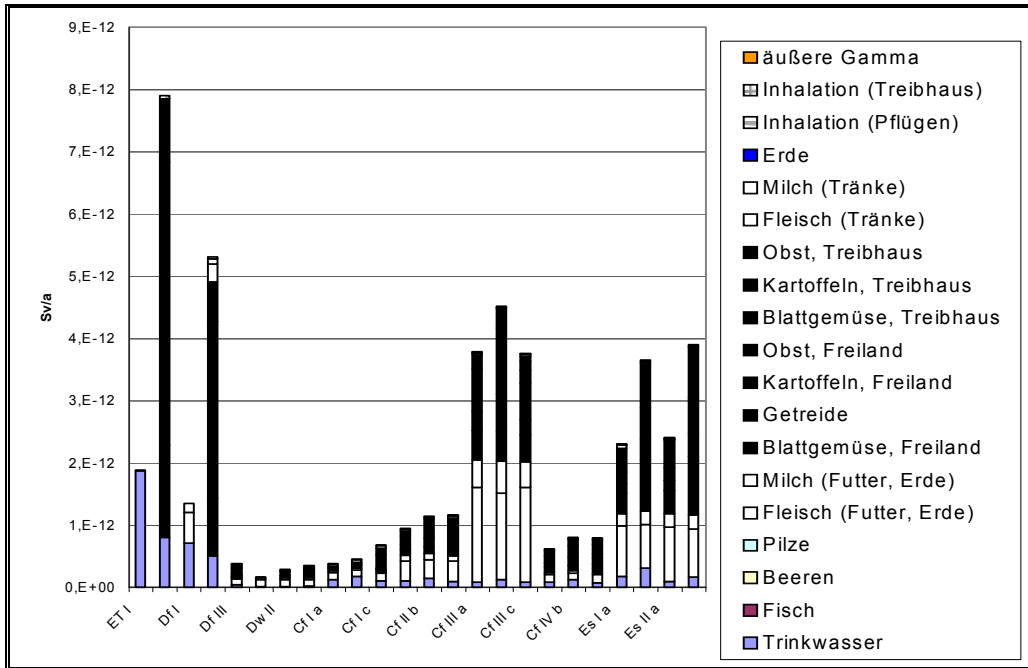


Abb. 7.27 Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 137 (1 Bq/a)

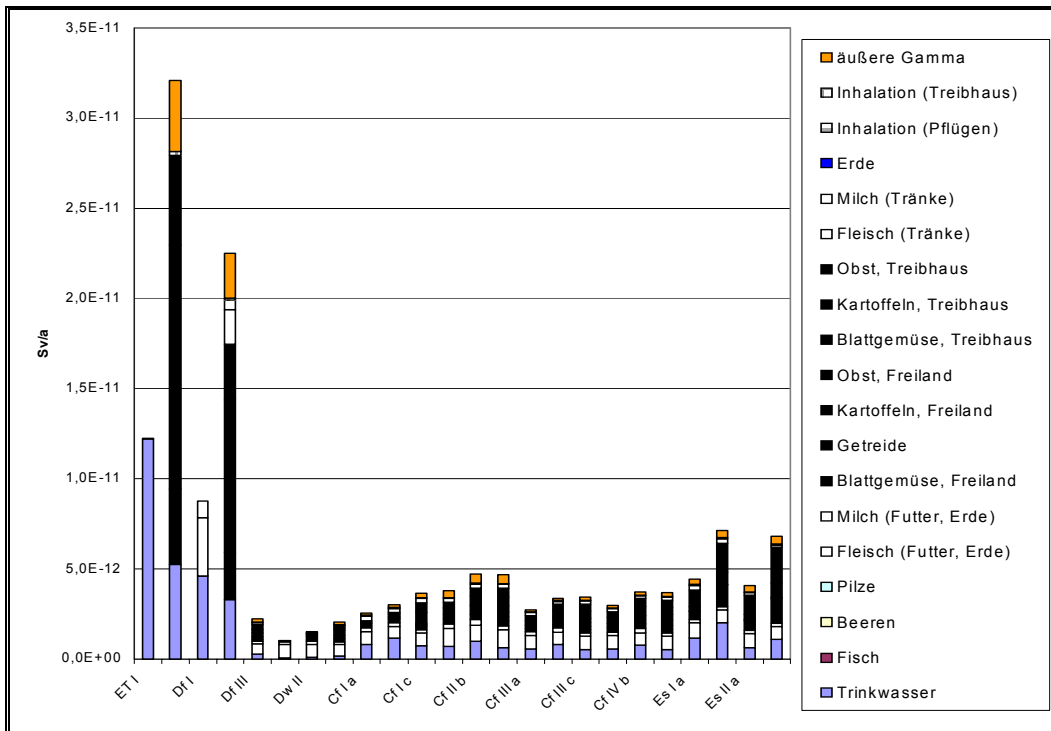


Abb. 7.28 Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/a)

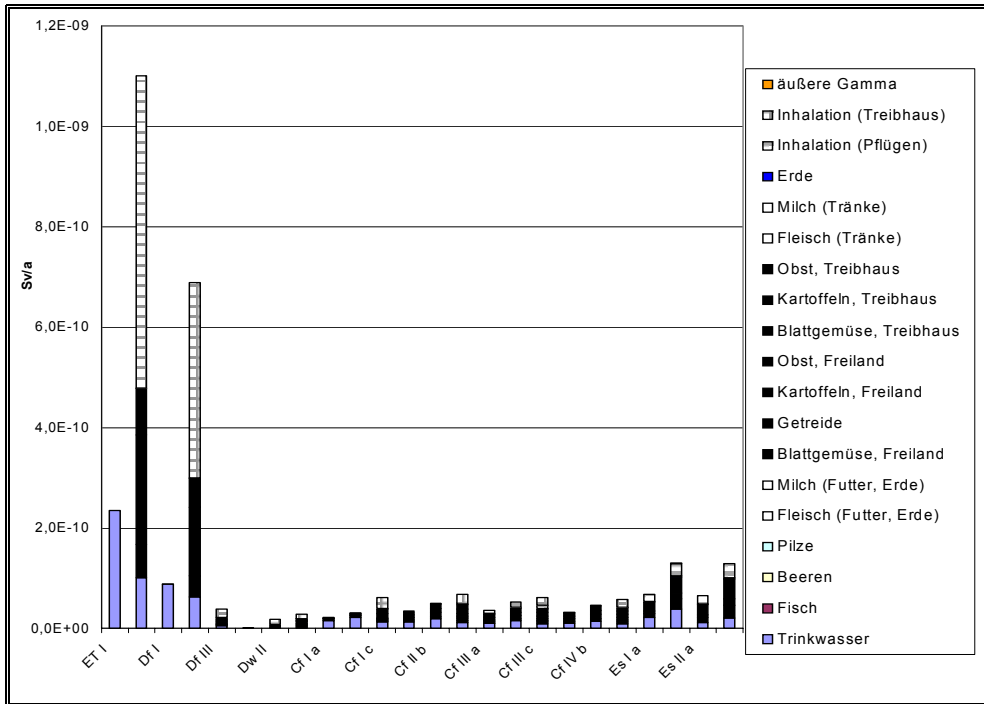


Abb. 7.29 Strahlenexposition durch Freisetzung von Am 241 (1 Bq/a)

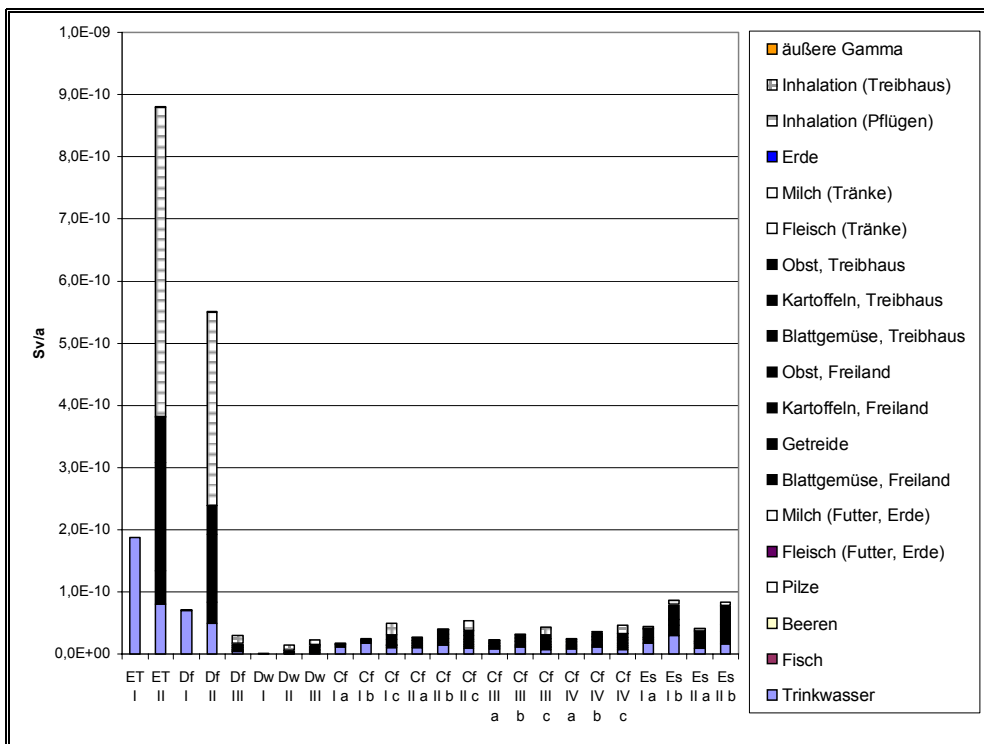
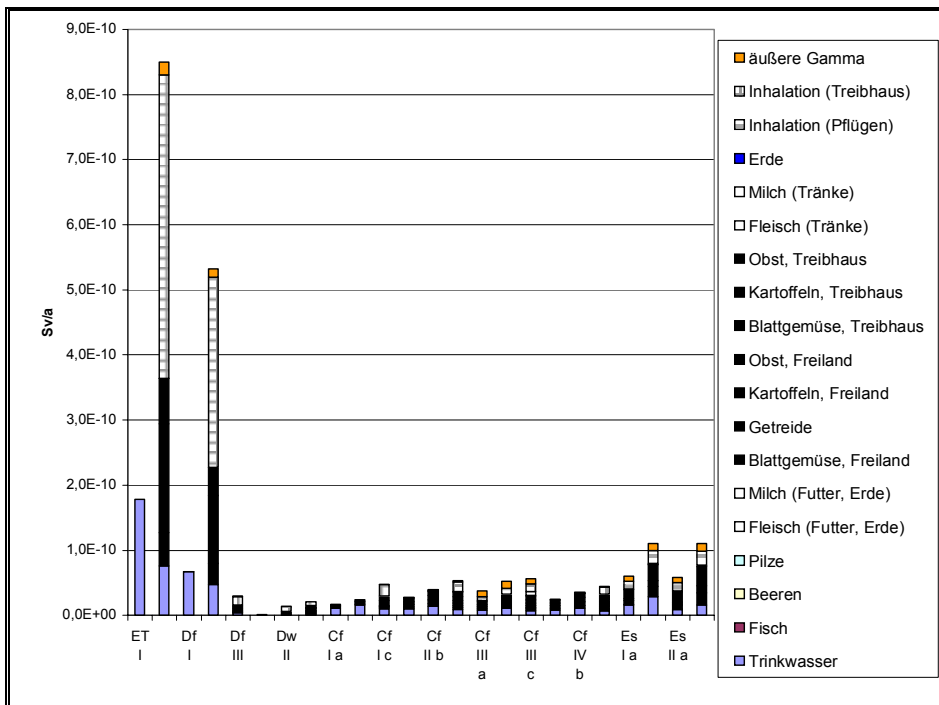


Abb. 7.30 Strahlenexposition durch Freisetzung von Cm 247 (1 Bq/a)

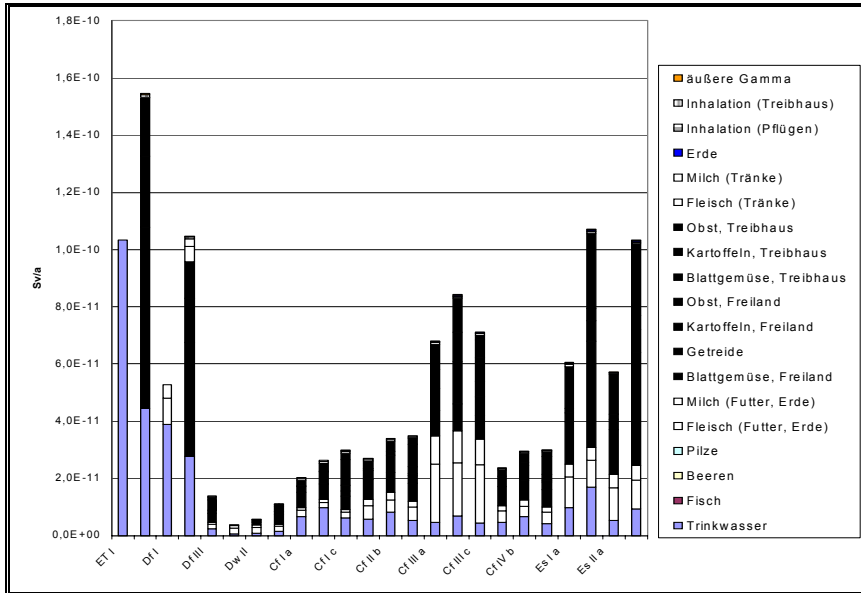


### 7.2.2.2 Berücksichtigung der unterschiedlichen Morphologie der Pflanzen

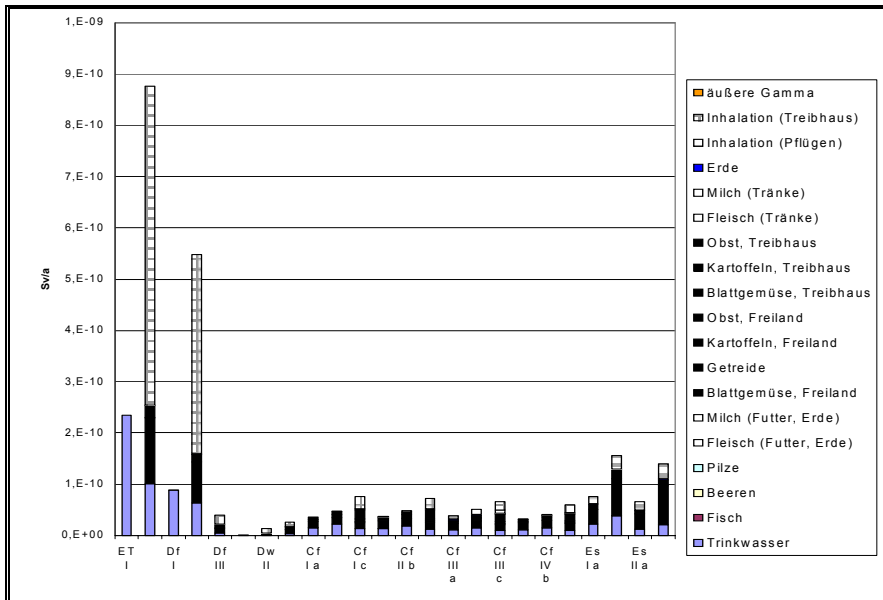
In den Abbildungen 7.31 und 7.32 wird die Dosis unter Berücksichtigung des realistischeren Modells für die Berechnung der Radionuklidkonzentration in Wurzelgemüse gezeigt. I 129 ist dabei Repräsentant für mobile Radionuklide, Pu 239 für immobile. In allen Fällen bleibt das Tundra-Szenario mit Nutzung von Treibhäusern Ausschlag gebend, aber der Unterschied zu den Berechnungs-Szenarien, insbesondere Es, ist geringer als bei Berechnung der Konzentration in Kartoffeln nach dem konservativen AVV-Modell.

Zu der erhöhten Homogenität der berechneten Strahlenexposition trägt auch bei, dass das alternative Modell keine kontinuierliche Beregnung mit geringer Intensität vorsieht, sondern praxisnäher davon ausgeht, dass die Beregnungsgaben von jeweils 20 bis 30 l in klima- und pflanzentypischen Abständen verabreicht werden. Entscheidend ist der angenommene zeitliche Abstand zwischen der letzten Beregnungsmaßnahme und der Ernte. Dies führt insbesondere bei den Szenarien mit geringem Beregnungsbedarf zu einer etwas erhöhten Dosis, die aber für die Auswahl des geeigneten Szenarios nicht von Bedeutung ist, weil diese Klimaszenarien nur relativ geringe Strahlendosen zur Folge haben.

**Abb. 7.31** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/l)  
Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie



**Abb. 7.32** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/l)  
Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie



### 7.2.3 Einsparung der Berechnung von Weiden

In allen bisher dargestellten Szenarien erfolgt eine Berechnung immer dann, wenn ein Feuchtigkeitsdefizit besteht. Nun kann zwar ein Feuchtigkeitsdefizit zu Ernteeinbußen führen, aber der ökonomische Nutzen einer Berechnung kann trotzdem hinter den ökonomischen Einbußen durch teure Investitionen zurückbleiben. In diesem Fall wird unterstellt, dass der Bauer die in manchen Jahren auftretenden schlechten Ernten hinnimmt. Weil das Verhältnis von Aufwand und Nutzen bei der Berechnung von Weiden ungünstiger ist als bei der Berechnung in Treibhäusern und Gärten oder auf Feldern, wird in den folgenden Abbildungen davon ausgegangen, dass die Berechnung von Weiden unterbleibt, während Felder und Gärten berechnet werden.

Die Folgen dieser Vorgehensweise hängen davon ab, ob das Brunnenwasser als Teil der Geosphäre mit gleich bleibender Radionuklidkonzentration aufgefasst wird oder als Teil der Biosphäre, in dem die Entnahme von Wasser auf die Radionuklidkonzentration zurückwirkt.

Wenn der Brunnen als Teil der Geosphäre behandelt wird, die Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser also die Eingangsgröße ist, dann führt die Einsparung der Berechnung von Weiden dazu, dass weniger Radionuklide in die Biosphäre gelangen und die Strahlenexposition geringer wird.

Die Reduktion ist im Fall der meisten Glieder der Zerfallsketten nur gering, weil diese Radionuklide nur schlecht in tierische Produkte übergehen; Reduktionen um mehr als 10 % werden allerdings bei kurzlebigen Radium- und Aktinium-Isotopen sowie Po 210 beobachtet. Bei einigen Einzelnukliden ist dagegen die Ingestion von tierischen Produkten bestimmend für die Höhe der Strahlenexposition. Bei den Radionukliden Cl 36, Ca 41, Rb 87, Cs 135 und Cs 137 ist die Reduktion größer und beträgt zwischen 50 und 60 %. Bei den übrigen Einzelnukliden sind Reduktionen bis zu 30 % zu erwarten.

Anders liegen die Dinge, wenn das Brunnenwasser als Teil der Biosphäre betrachtet wird. Dann ist Source term die jährlich freigesetzte Aktivität, woraus folgt, dass die Konzentration im Brunnenwasser höher wird, wenn weniger Brunnenwasser gefördert wird. In diesem Fall wirkt sich die Nichtberechnung der Weiden anders auf die Gesamtdosis aus. Dies wird im Folgenden näher beleuchtet.

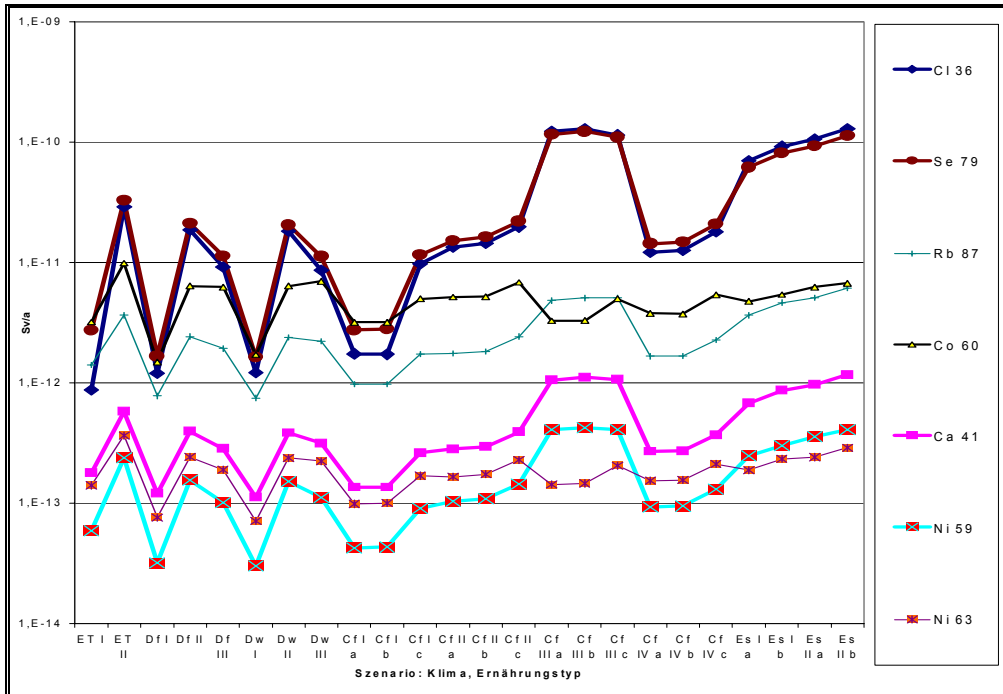


Die Abbildungen 7.33 bis 7.37 zeigen die Höhe der Strahlenexposition unter den verschiedenen Klimabedingungen. Der Berechnung der Radionuklidkonzentration in Pflanzen wird hier wieder die Methode der AVV /BMU 01/ zugrunde gelegt. Wie im vorigen Abschnitt dargelegt wurde, wird nach dieser Methode die Strahlenexposition durch Aufnahme von Wurzelgemüse (Kartoffeln) überschätzt, besonders, wenn immobile Radionuklide betrachtet werden, aber der Überschätzungsfaktor ist gering gegenüber der Wirkung der Einsparung einer Berechnung von Weideland.

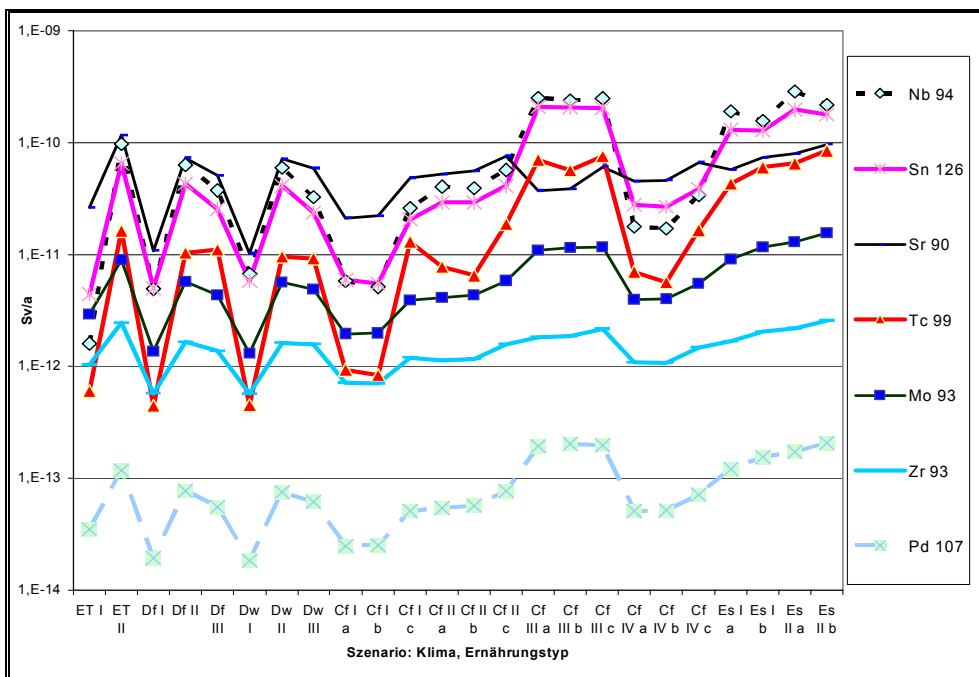
In den Szenarien der Tundra (ET I, ET II) und der nördlichen atlantisch geprägten Taiga (Df I, Df II) werden Weiden auch in den bereits behandelten Szenarien nicht berechnet. Damit entfällt die Betrachtung der Unterschiede.

Große Unterschiede werden im kontinentalen Teil der Taiga (Dw) beobachtet. Die Strahlenexposition steigt hier auf das Dreifache bis Sechzigfache der Werte des Standardfalls. Die höchsten Anstiege sind bei den Radionukliden der Zerfallsketten zu verzeichnen. Die Höhe des Anstiegs in diesem Klima beruht auf zwei Effekten: der Konsum an tierischen Lebensmitteln ist hier hoch, dabei die Produktivität des Bodens gering, so dass die Tiere viel Weideland beanspruchen, womit sich ein hoher Wasserverbrauch ergibt, der eingespart werden kann und de facto auch eingespart wird. Weniger bedeutend ist der Anstieg der Gesamtdosis in den anderen Szenarien. Hier ist je nach Radionuklid ein Faktor 2 bis 7.5 in allen Szenarien des feuchtgemäßigten Klimas (Cf) und des Mittelmeerklimas (Es) zu verzeichnen, im südlichen Teil der atlantisch geprägten Taiga (Df III) liegt der Anstieg zwischen dem 10 und 17fachen.

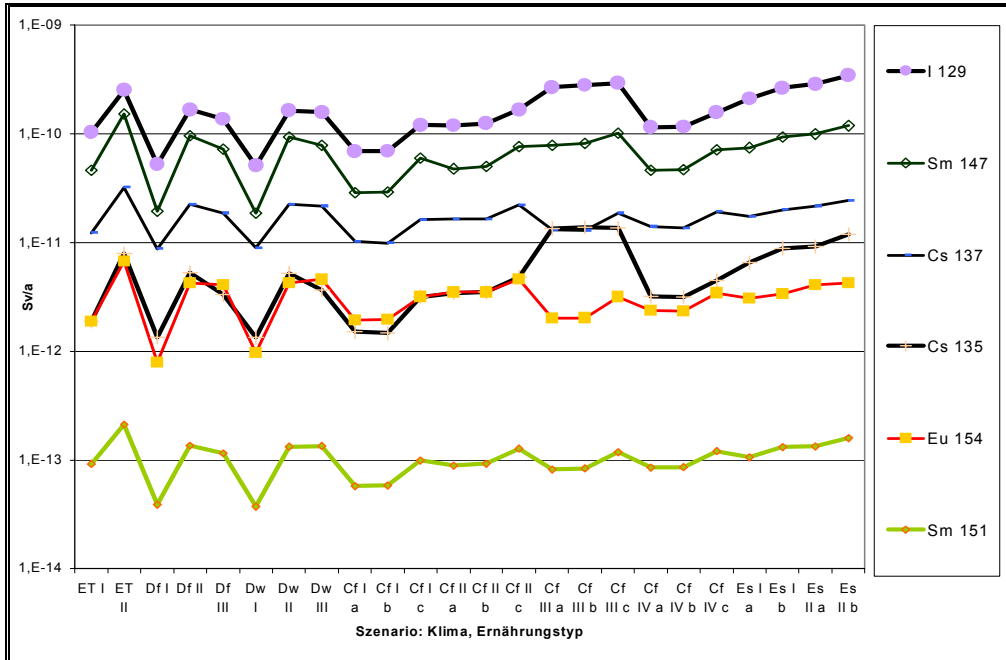
**Abb. 7.33a** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Einzelnuclide Teil 1



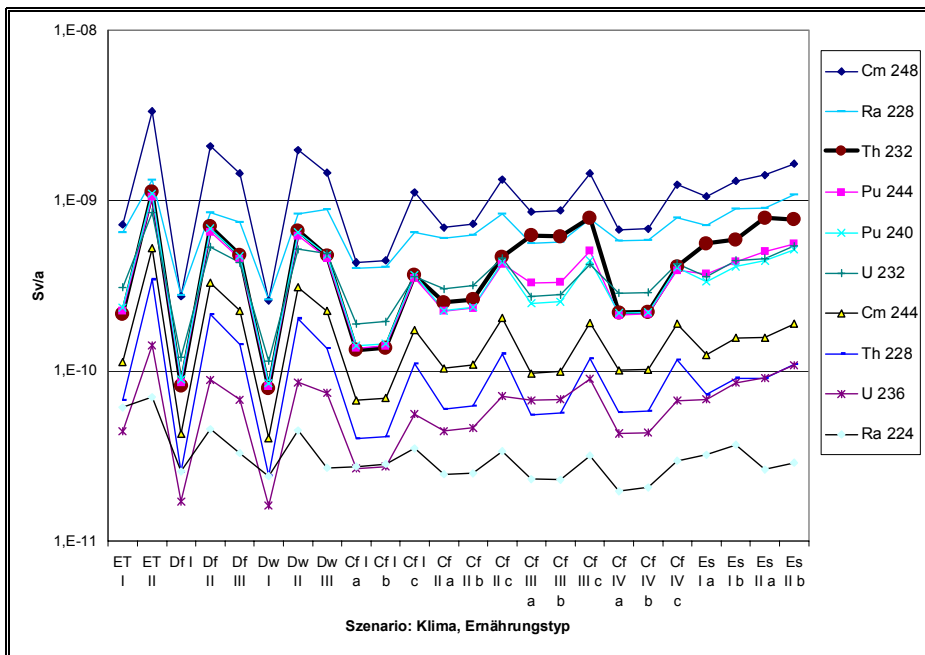
**Abb. 7.33b** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Einzelnuclide Teil 2



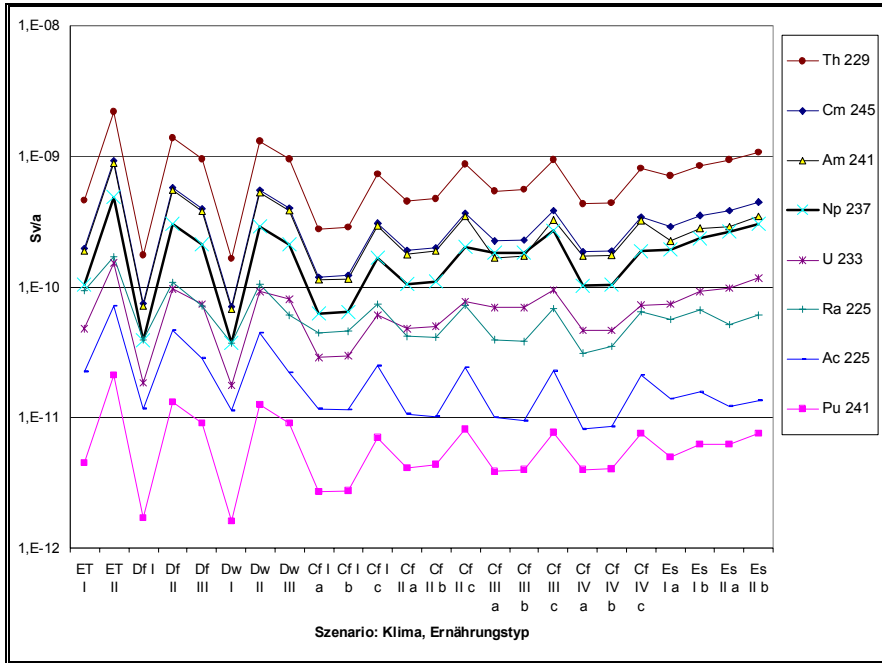
**Abb. 7.33c** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Einzelnuclide Teil 3



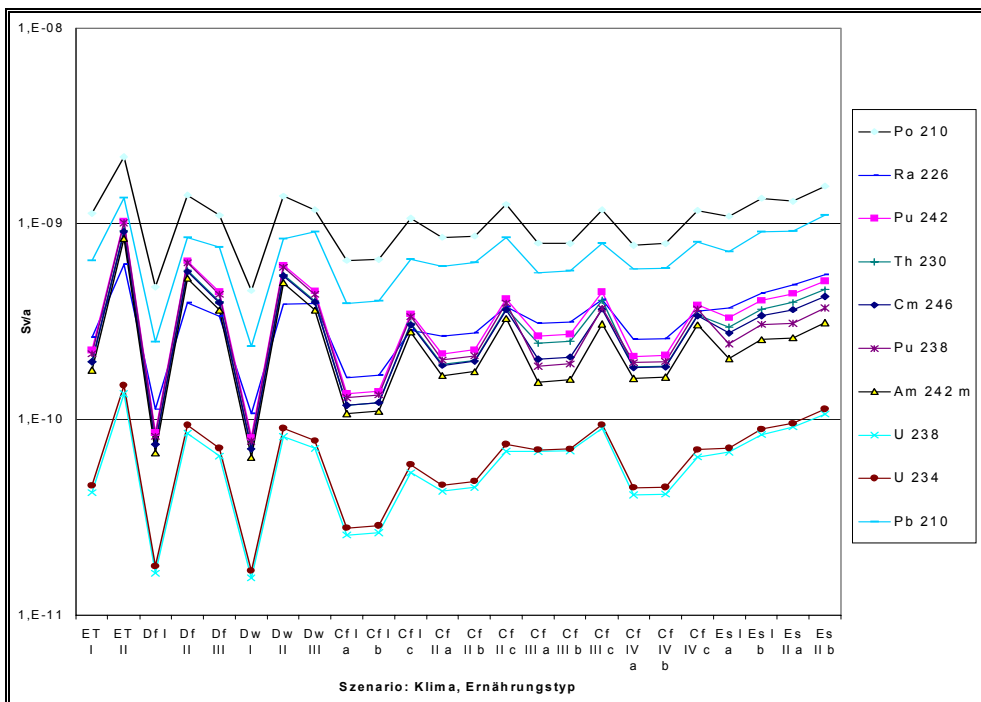
**Abb. 7.34** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Thorium-Reihe



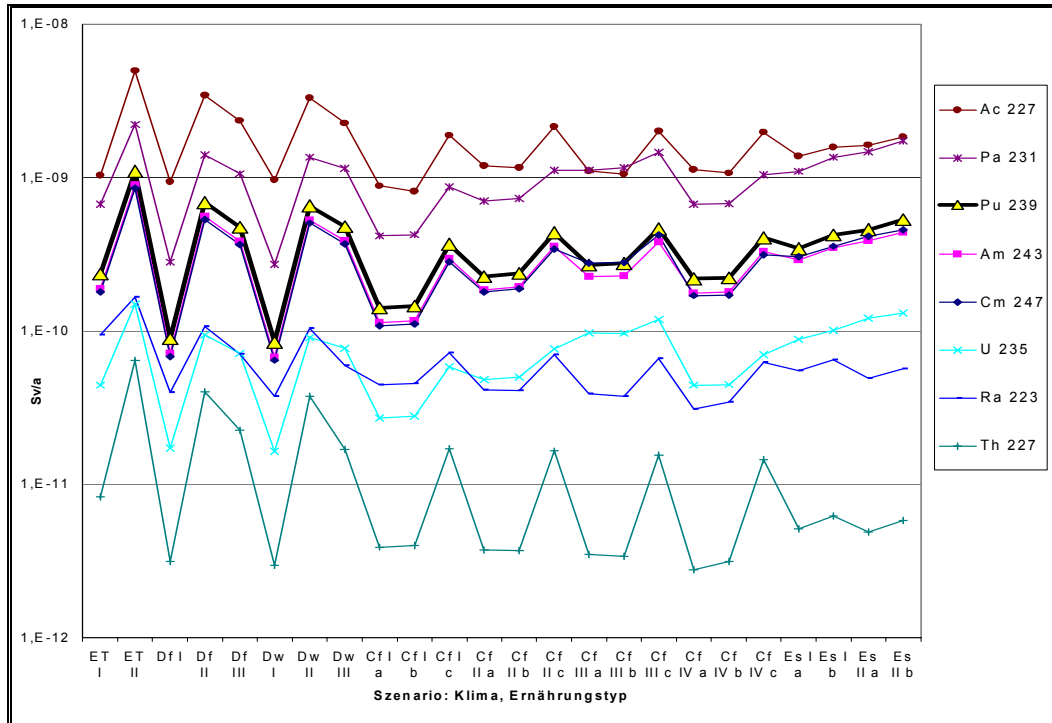
**Abb. 7.35** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Neptunium-Reihe



**Abb. 7.36** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Uran-Radium-Reihe



**Abb. 7.37** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq /a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Aktinium-Reihe

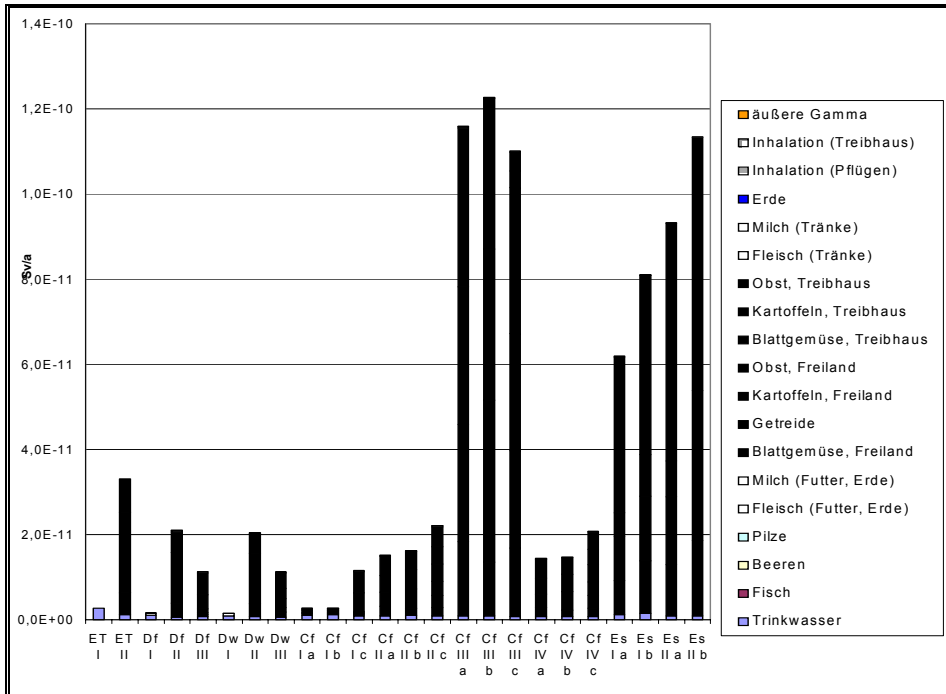


Die folgenden Abbildungen zeigen die Auswirkungen der Einsparung der Beregnung von Weiden auf die Strahlenexposition durch einzelne Radionuklide.

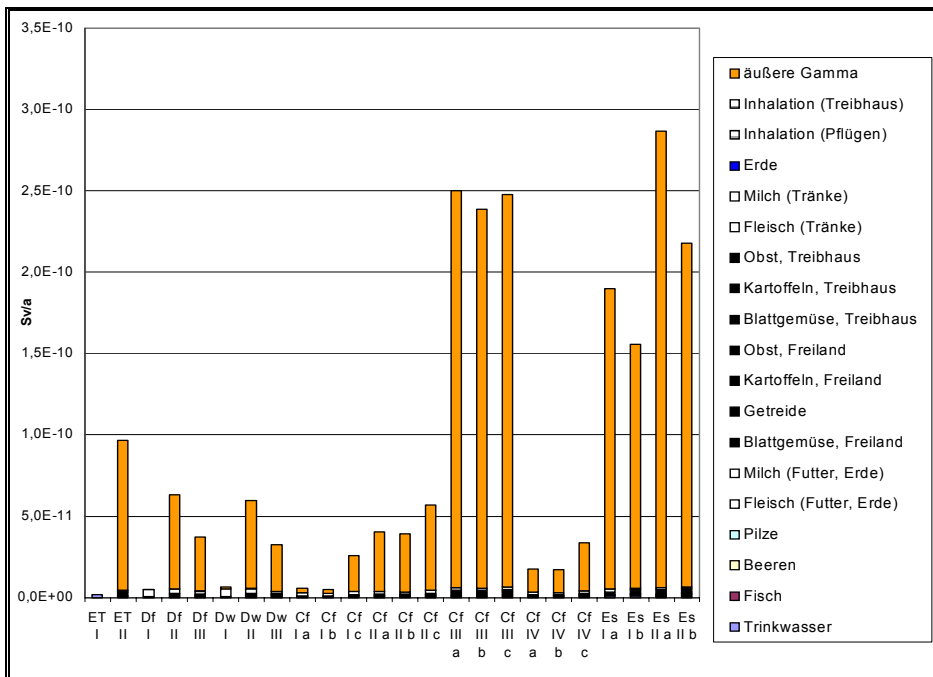
Weil im Szenario mit der höchsten Strahlenexposition, nämlich in der Tundra (ET II), sowieso keine Weiden beregnet werden, wirkt sich die Annahme der Einsparung der Beregnung hier nicht aus. Die Strahlenexposition in den anderen Szenarien steigt an, wie oben dargelegt wurde, so dass sich das Maximum allgemein verschiebt.

Bei den Einzelnucliden ist, genau wie im Fall, dass die Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser als Eingangsgröße in die Berechnungen eingeht, im Etesienklima mit hoher Beregnungsrate (Es II) oder im kontinentalen feuchtgemäßigten Klima (Cf III) die Strahlenexposition maximal. Bei dem kurzlebigen Cs 137 bleibt zwar das Tundrenklima mit der gleichen Dosis wie bisher kritisch, aber der Abstand zu den anderen Klimabedingungen wird geringer. Ebenso verhalten sich auch viele Glieder der Zerfallsketten: die maximale Belastung findet im Szenario ET II statt, aber der Abstand zu den anderen Szenarien verkürzt sich.

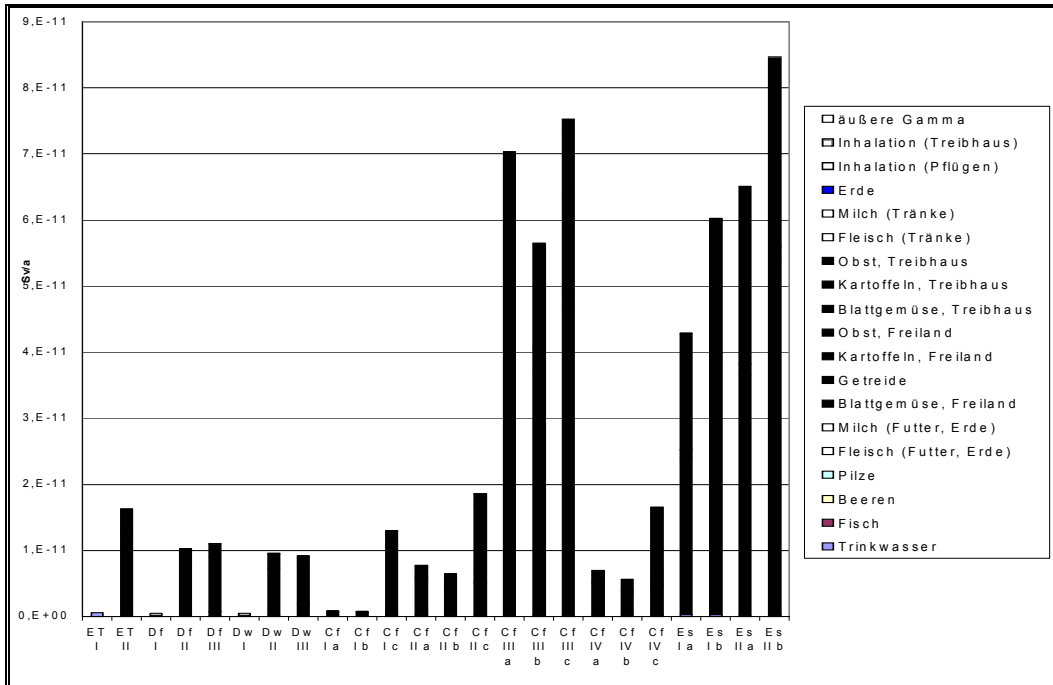
**Abb. 7.38** Strahlenexposition durch Freisetzung von Se 79 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden



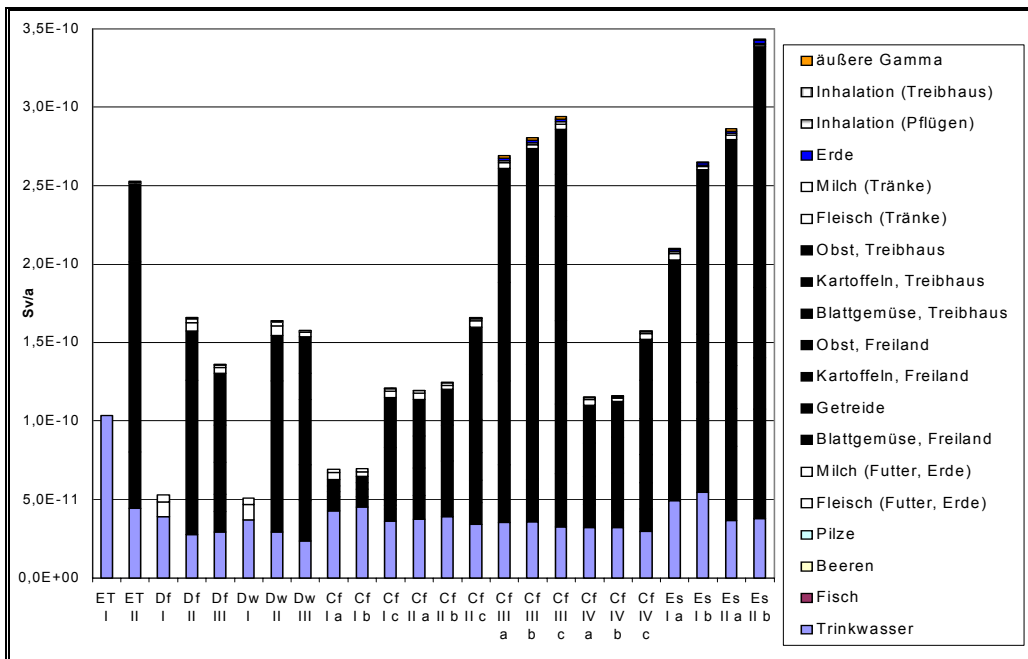
**Abb. 7.39** Strahlenexposition durch Freisetzung von Nb 94 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden



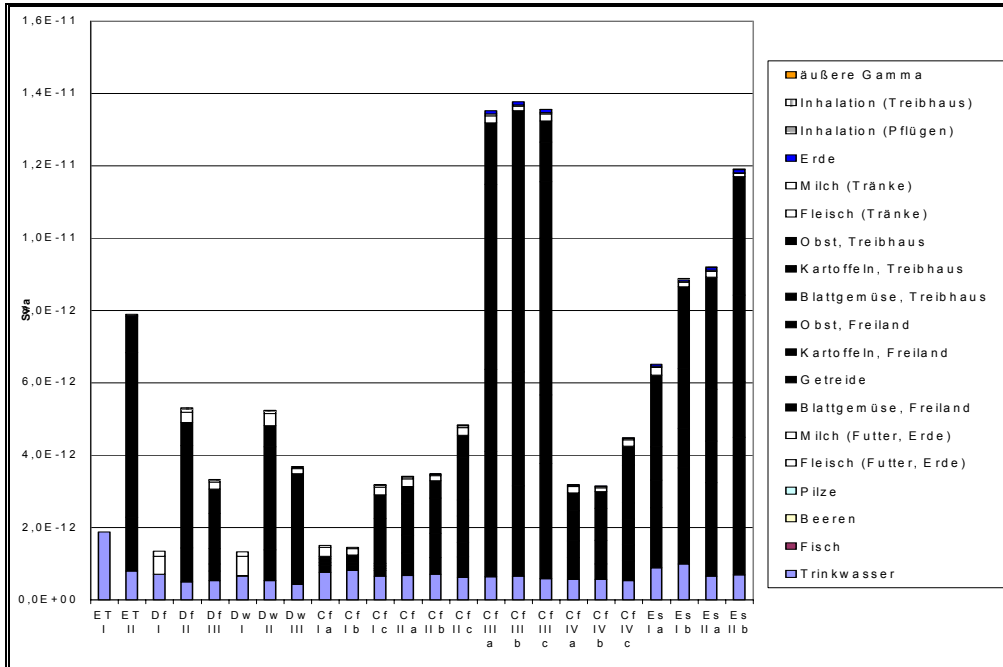
**Abb. 7.40** Strahlenexposition durch Freisetzung von Tc 99 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden



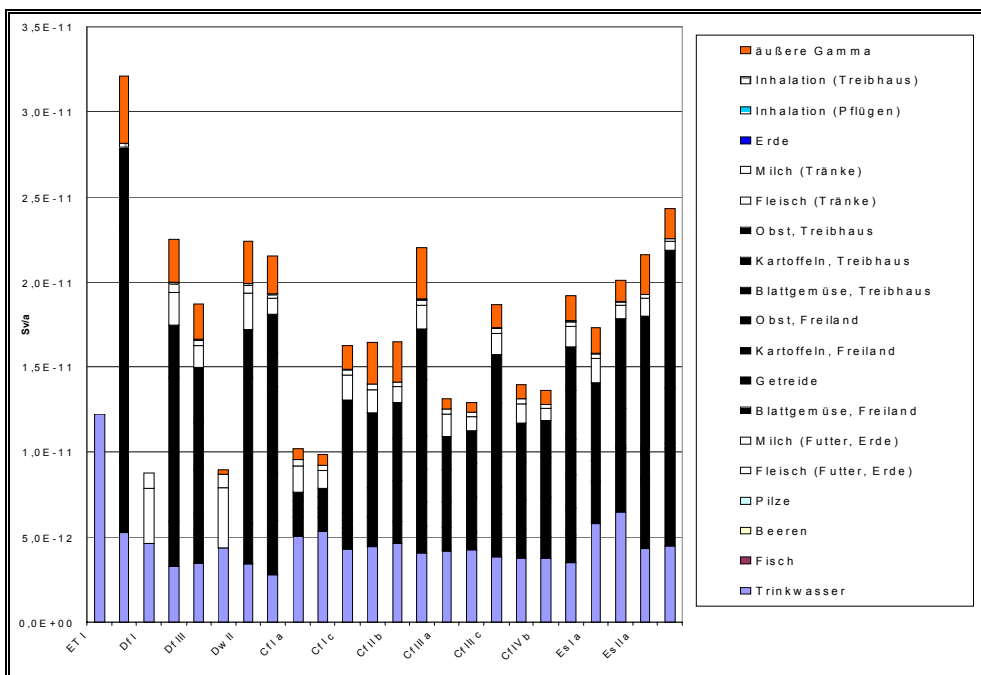
**Abb. 7.41** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden



**Abb. 7.42** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 135 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

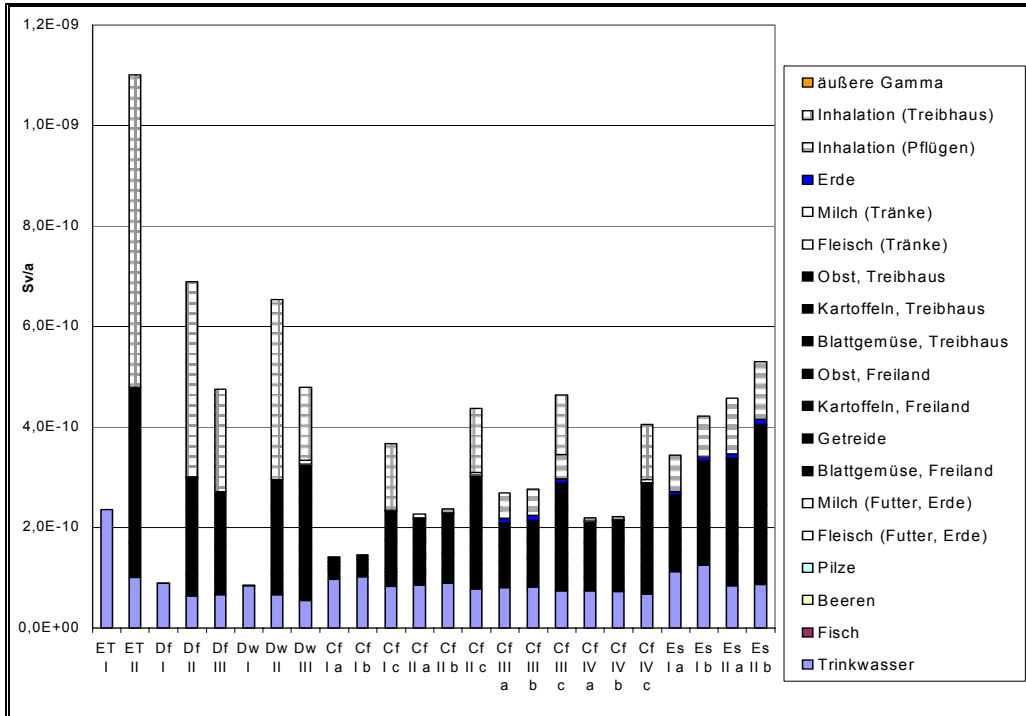


**Abb. 7.43** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 137 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

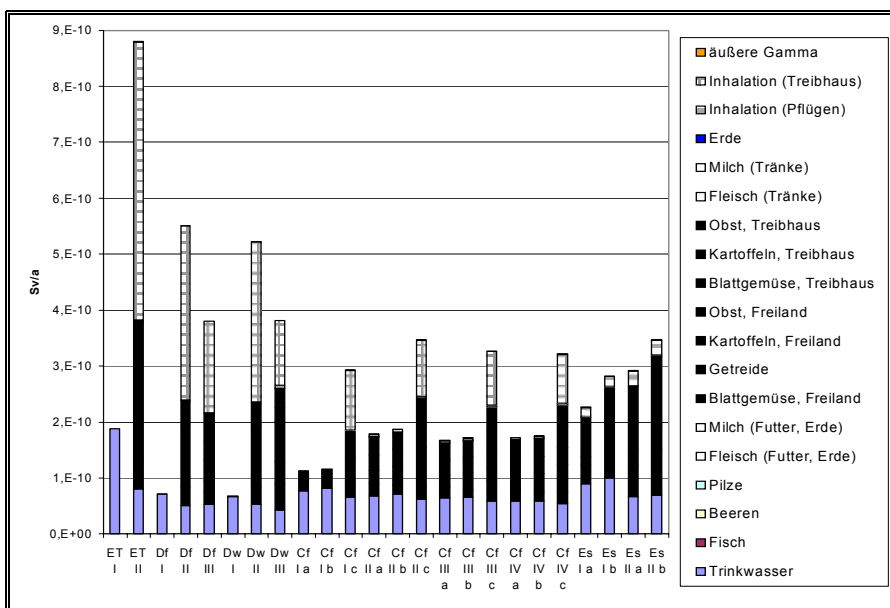




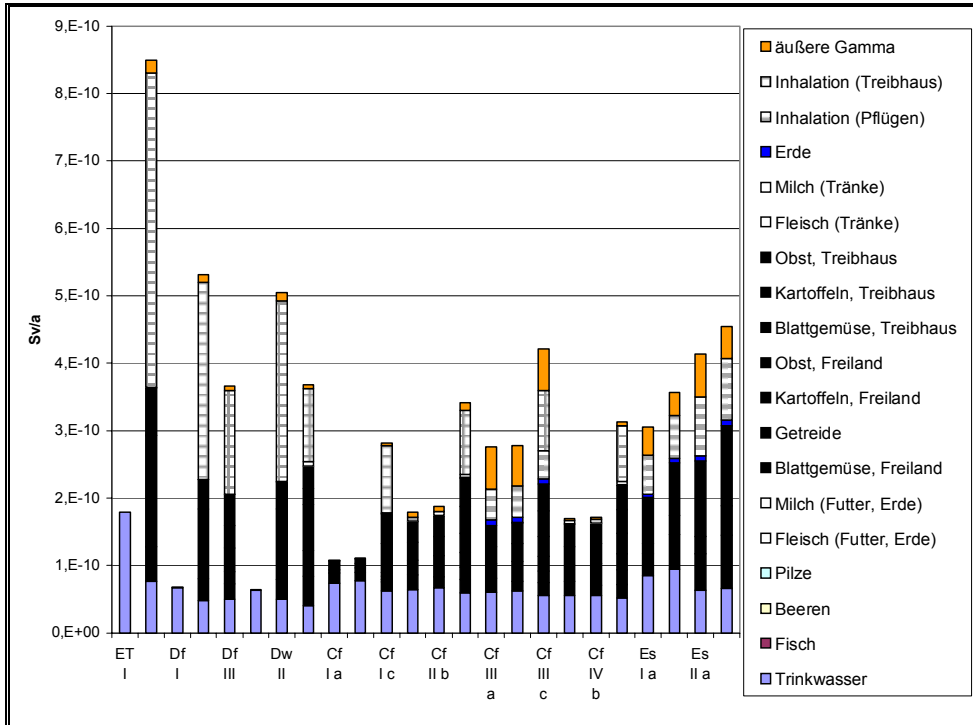
**Abb. 7.44** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht beregnet werden



**Abb. 7.45** Strahlenexposition durch Freisetzung von Am 241 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht beregnet werden

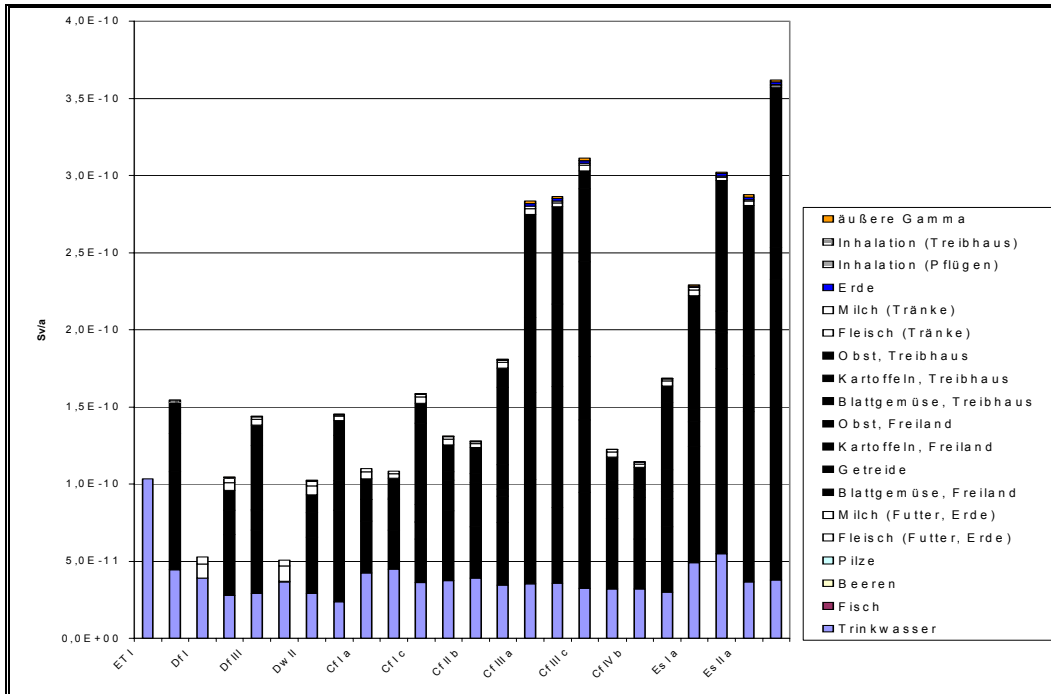


**Abb. 7.46** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cm 247 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

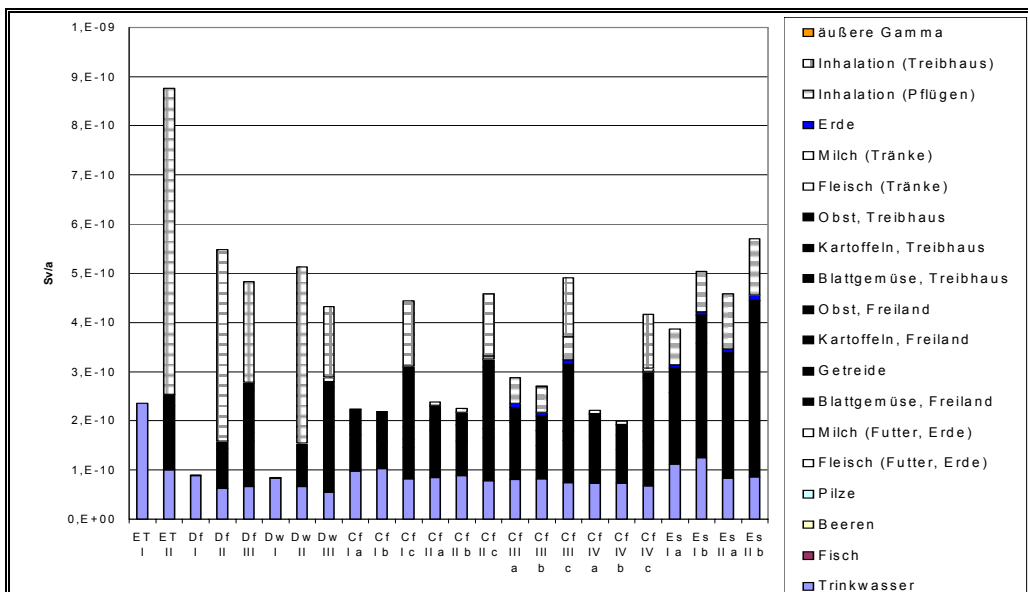


Die folgenden Abbildungen geben die Strahlenexposition durch das mobile I 129 (Abbildung 7.47) und das immobile Pu 239 (Abbildung 7.48) wieder, wenn sie nach dem pflanzenspezifischen Modell berechnet wird. Die Wirkung besteht wieder darin, dass den warmen Szenarien eine höhere Bedeutung zukommt. Zwar verschiebt sich bei den ausgewählten Radionukliden in diesem Falle nicht das Maximum, aber bei Pu 239 erfolgt eine deutliche Annäherung der Strahlenexposition in kalten Treibhaus-Szenarien und warmen Freiland-Szenarien. Im Falle von I 129 tritt die höchste Strahlenexposition nach beiden Modellen im Etesienklima mit hohem Mangel an sommerlichen Niederschlägen bei Ernährung unter besonderer Berücksichtigung pflanzlicher Erzeugnisse auf (Es II b).

**Abb. 7.47** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden. Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie.



**Abb. 7.48** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden. Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie.



## 7.3 Bewertung der Ergebnisse

### 7.3.1 Allgemeines

In allen Berechnungsbeispielen befindet sich das Endlager geographisch in einer tiefen Gesteinsformation unter einer Ebene im Binnenland in geringer Meereshöhe im norddeutschen Raum. Es wird immer davon ausgegangen, dass das Wasser über einen Brunnen in die Biosphäre gelangt.

Die Strahlenexposition wird für elf verschiedene jeweils konstant bleibende Klimasituationen berechnet. Dazu wird für jede Klimasituation eine in sich konsistente Biosphäre zusammengestellt, die in der Hauptsache aus dem Boden und den der menschlichen Ernährung dienenden Pflanzen und Tieren besteht; in den Fällen, in denen keine Beregnung von Feldern oder Weiden erfolgt, wird zusätzlich ein Fließgewässer berücksichtigt. Anbauprodukte und Erzeugungsmethoden werden klimatypisch modelliert, außerdem wird beachtet, dass unter jeder Klimasituation verschiedene Ernährungsweisen möglich sind.

Die eingesetzten Parameterwerte sind Best-estimate-Werte für das jeweilige Klima; Ausnahmen von dieser Regel betreffen die Transferfaktoren  $T_r^{\text{Pflanze}}$  für den Übergang von Radionukliden aus dem Boden in die Pflanzen und  $T_r^{\text{Tier}}$  für den Übergang aus dem Tierfutter in tierische Nahrungsmittel, die Faktoren für die Absorption ( $f_r^{\text{abs}}$ ) und die Translokationsfaktoren ( $f_{r,\text{Pflanze}}^{\text{trans}}$ ). Mangels ausreichender Datenbasis werden diese Faktoren einheitlich für alle Klimaten verwendet. Unsicherheitsanalysen werden nicht vorgenommen, obwohl einige der genannten Parameterwerte nur unzureichend abgesichert sind. Der Aufbau von Tochterprodukten im Boden wird vernachlässigt.

Jüngst wurden die Dosisfaktoren in /BMU 89/ durch /BFS 00/ ersetzt. Da viele Dosisfaktoren für Inhalation nach /BFS 00/ deutlich kleiner als nach /BMU 89/ sind, verringerten sich durch die Implementierung der neuen Dosisfaktoren insbesondere die Dosen für die Radionuklide der Zerfallsketten in den Szenarien, in denen die Inhalation eine wichtige Rolle spielt. Reduktionen um einen Faktor zwei und mehr traten häufig auf. Zur Klarstellung sei gesagt, dass alle hier vorgelegten Ergebnisse mit den neuen Dosisfaktoren /BFS 00/ erzielt wurden.

Auf Grund dieser durch die Dosisfaktoren bedingten inhärenten Unsicherheit wird davon ausgegangen, dass die Strahlenexposition höchstens auf einen Faktor zwei genau bestimmt werden kann. Das heißt, zwei Szenarien, in denen sich die Strahlenexposition um weniger als einen Faktor zwei unterscheidet, werden als gleichwertig angesehen.

### **7.3.2 Brunnenwasser als Teil der Geosphäre**

Wenn das Brunnenwasser als Teil der Geosphäre aufgefasst wird, gehen die radioökologischen Berechnungen von der Radionuklidkonzentration im Brunnenwasser (Bq/l) aus, die nicht durch die Entnahmemengen beeinflusst wird.

Die Ergebnisse für die Strahlenbelastung zeigen eine große Homogenität in Bezug auf einige Charakteristika:

1. Die Strahlenexposition durch Verzehr von Fischen nach Einleitung von Brauchwasser in ein Fließgewässer ist in allen Fällen vernachlässigbar (maximal 0.1 % der gesamten Exposition im entsprechenden Szenario).
2. Die Strahlenexposition durch Verzehr von Pilzen und Beeren aus dem Überschwemmungsgebiet ist in allen Fällen vernachlässigbar (jeweils unter 0.05 % der gesamten Exposition im entsprechenden Szenario)
3. Die Strahlenexposition durch Verzehr von Milch und Fleisch, das von Tieren (sowohl von Rindern als auch von Rentieren) stammt, die im Überschwemmungsgebiet geweidet haben, ist in allen Fällen vernachlässigbar (jeweils unter 0.1 % der gesamten Exposition im entsprechenden Szenario)
4. Der Beitrag des Verzehrs von Trinkwasser zur Gesamtdosis ist je nach Szenario und Radionuklid sehr variabel. Höchstwerte von bis zu 35 % ergeben sich bei sehr kurzlebigen Gliedern der Zerfallsketten, also Radionukliden mit untergeordneter Relevanz für die Höhe der Strahlenexposition durch die entsprechende Kette. Wenn die direkte Freisetzung von Tochternukliden mit Halbwertszeiten unter einem Jahr ausgeklammert wird, erreicht der Beitrag des Trinkwassers noch maximal 17 %. Die minimalen Werte liegen bei etwa 0.1 % der gesamten Strahlenexposition. In Einzelfällen, wenn Tochterprodukte einen hohen Dosisbeitrag liefern, sinkt die relative Bedeutung des Trinkwasserpfades noch.

5. Hinsichtlich der übrigen Expositionspfade lassen sich die Radionuklide in einige große Gruppen einteilen. Von der Gruppenzugehörigkeit hängt einerseits der Beitrag der einzelnen Expositionspfade zur Gesamtdosis ab, andererseits auch das Szenario, das die höchsten Expositionen mit sich bringt. Zu unterscheiden sind:
- a) Radionuklide mit hohen Dosisfaktoren für die Inhalation
  - b) Radionuklide, die oral gut von Tieren und Menschen aufgenommen werden, das sind häufig, aber nicht immer, Radionuklide mit einem hohen Transferfaktor Boden-Bewuchs
  - c) Radionuklide mit hohen Dosisleistungsfaktoren für externe Bestrahlung
  - d) Kurzlebige Radionuklide (Halbwertszeiten unter 100 Jahre)
  - e) Radionuklide mit radioaktiven Tochterprodukten.

Die genannten Eigenschaften schließen einander nicht aus, so dass ein Radionuklid gleichzeitig zu mehreren Gruppen gehören kann.

Zur Gruppe der Radionukliden mit hohen Dosisfaktoren für die Inhalation gehören viele Radionuklide aus den Zerfallsketten. Bei diesen Radionukliden kann die Inhalation zur Höhe der Strahlenexposition maßgeblich beitragen. Eine signifikante Exposition durch Inhalation besteht nur bei der Arbeit, und zwar einerseits im Treibhaus und andererseits auf dem Feld. Die Inhalationsdosis auf dem Felde hängt von der Langlebigkeit des Radionuklids bzw. seines Tochterprodukts ab, außerdem vom Klima, insbesondere Temperatur und Niederschlag im Sommer, und von den Bodeneigenschaften; bei der Inhalation im Treibhaus spielen Anreicherungsverfahren keine Rolle. Folglich treten die höchsten Dosen durch kurzlebige Radionuklide in den Treibhaus-Szenarien auf. Wenn das Radionuklid selbst oder seine Tochter langlebig ist, ist unter den Bedingungen des Etesienklimas (Es II) und des kontinental geprägten gemäßigten Klima (Cf III) mit der höchsten Inhalationsdosis zu rechnen.

Bei den Radionukliden mit hohem Dosisfaktor für Inhalation ist in den kalten und kühlen Klima-Szenarien die Frage, ob Treibhäuser im Szenario vorhanden sind oder nicht, wichtiger als die genaue Höhe der Beregnung und die genaue Zusammensetzung des Nahrungskorbes aus tierischen und pflanzlichen Nahrungsmitteln.

Die höchste Exposition durch Radionuklide, die oral gut aufgenommen werden, wird unter den Bedingungen des Etesienklimas (besonders Es II) und im kontinental geprägten feuchtgemäßigten Klima (Cf III) beobachtet. Dabei ist Es II eher wichtig für Radionuklide mit niedrigem Transferfaktor Boden-Bewuchs und für Radionuklide mit kürzerer Halbwertszeit, Cf III für langlebige Radionuklide mit hohem Transferfaktor. Grund dafür ist, dass die Anreicherung im Boden in Cf III weit ausgeprägter ist als in Es II. Das Kriterium der Langlebigkeit ist hier auch dann erfüllt, wenn etwaige Tochterprodukte eine lange Halbwertszeit haben.

Bei Radionukliden mit kurzer Halbwertszeit, die ebenfalls gut oral aufgenommen werden und außerdem einen hohen Transferfaktor für den Übergang in tierische Produkte aufweisen (Co 60, Sr 90, Cs 137, aber auch Ni 63 und Eu 154), ist das kontinentale Klima der transbaikalischen Taiga Dw ebenfalls wichtig auf Grund der relativ hohen Beregnung. Hinsichtlich der Freisetzung aus einem Endlager spielt aber keines der Radionuklide dieser Gruppe eine überragende Rolle.

Für Radionuklide mit hohem Dosisleistungsfaktor für externe Bestrahlung (z. B. Nb 94, Sn 126, Co 60, Eu 154, aber z.B. auch Th 232, Ra 226 und U 235) kommt es auf die Anreicherung in und auf dem Boden an. Die Anreicherung im Boden ist am höchsten in Szenario Cf III, wenn das Radionuklid selbst oder ein Tochterprodukt langlebig ist, die Anreicherung auf dem Boden ist maximal in Szenario Es II auf Grund der hohen Beregnungsrate. Die Vernachlässigung des Aufbaus der Tochternuklide bei den hier dargestellten Berechnungen wirkt sich insbesondere auf die berechnete externe Strahlenexposition auf berechneten landwirtschaftlichen Nutzflächen in Szenario Cf III aus.

Prädestiniert für hohe Dosen sind somit die Treibhaus-Szenarien, das Etesienklima Es II und das kontinental geprägte feuchtgemäßigte Klima Cf III. Das kontinentale Klima Dw ist nur im Falle von sonst eher unwichtigen relativ kurzlebigen Radionukliden bedeutend.

Die Höhe der Strahlenexposition unter den Bedingungen der übrigen Klimaten ist für sich genommen nicht ausschlaggebend, aber in ihrer Gesamtheit liefern diese Klimabedingungen eine wichtige Hilfe bei der Abschätzung der zu erwartenden Dosis, denn es zeigt sich, dass viele Szenarien zu ungefähr gleichen Dosen führen. So wird bei

den Einzelnucliden die Hälfte der maximalen Dosis in durchschnittlich sechs weiteren Szenarien und bei den Kettengliedern sogar in durchschnittlich neun weiteren Szenarien überschritten, jedenfalls, solange Tochternuclide nicht betrachtet werden. Damit besteht eine hohe Sicherheit hinsichtlich der Größenordnung der zu erwartenden Dosis.

Die vorstehend dargestellten Ergebnisse gelten, wenn das Modell der AVV für die Berechnung der Radionuclidkonzentration in Pflanzen angewendet wird.

Falls die Besonderheiten der einzelnen zum Verzehr bestimmten Pflanzenteile bei der Berechnung der Radionuclidkonzentration beachtet werden, ergeben sich hierzu nur geringfügige Abweichungen: Die unter Punkt 1 bis 3 angeführten Aussagen bleiben bestehen. Die relative Bedeutung des Trinkwassers (Punkt 4) ist bei diesem Modell höher, weil die gesamte Strahlenexposition in den meisten Szenarien niedriger ist, während die Exposition durch Trinkwasser gleich bleibt. Sie reicht nun von 0.1 % bis 19 %. Bei diesen Zahlen werden wie im oben beschriebenen Modell die Radionuclide aus den Ketten ausgeklammert, deren Halbwertszeit weniger als ein Jahr beträgt. Ebenso ist auch hier der Beitrag des Trinkwassers im Falle einiger Ketten zu hoch angesetzt, weil der Aufbau von Tochternucliden im Boden nicht berechnet wurde.

Die Bedeutung der Ingestion von Kartoffeln sinkt, wenn Kartoffeln adäquat modelliert werden. Das führt dazu, dass die Ingestionsdosis in den kalten und kühlen Klima-Szenarien stärker sinkt als in den warmen Szenarien, denn in den kalten und kühlen Szenarien stehen mehr Kartoffeln auf dem Speiseplan der Bevölkerung. Folge hiervon ist eine Absenkung der Bedeutung der kalten und kühlen Klima-Szenarien mit der Konsequenz, dass die relative Bedeutung des Szenarios Cf III und Es II weiter steigt. Die Methode für die Berechnung der Radionuclidkonzentration in Kartoffeln und Wurzelgemüse bewirkt nur in Ausnahmefällen, nämlich bei einigen wenig wichtigen kurzlebigen Radionucliden, eine Veränderung des Klimaszenarios, in dem die Dosis durch ein bestimmtes Radionuclid maximiert ist. Die Absenkung der maximalen Dosis liegt im Bereich von nur einigen bis einigen Dutzend Prozent.

Ein wichtiger Indikator für die Sicherheit der Abschätzung der Dosis ist die Anzahl der weiteren Szenarien, in denen die Dosis mehr als 50 % der maximalen Dosis beträgt. Es ergeben sich mit durchschnittlich 6 weiteren Szenarien bei den Einzelnucliden und



durchschnittlich zehn weiteren Szenarien bei den Kettengliedern nur geringfügige Unterschiede zu den Ergebnissen nach den Berechnungsmethoden der AVV für die Radionuklidkonzentration in Pflanzen, wie auch zu erwarten ist, da sich auch die Dosen nur geringfügig ändern.

### **7.3.3 Brunnenwasser als Teil der Biosphäre**

Wenn das Brunnenwasser als Teil der Biosphäre aufgefasst wird, muss die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre als jährliche Freisetzung in das Brunnenwasser angegeben werden (Bq/a). Die Klimabedingungen, in denen eine Freisetzung von Radionukliden die höchsten Konsequenzen hat, sind für die weitaus meisten Radionuklide das Tundrenklima ET und das feuchtwinterkaltes Klima Df, in beiden Fällen unter der Bedingung, dass Treibhäuser genutzt werden. Die Strahlenexpositionen in den übrigen Klima-Szenarien ist normalerweise weniger als halb so hoch. Eine Ausnahme gilt nur für Radionuklide, die besonders leicht von Pflanzen und Tieren aufgenommen werden: Cl 36, Ca 41, Se 79, Tc 99 und Sn 126. Bei diesen Radionukliden treten hohe Strahlenexpositionen in mehreren verschiedenen Klima-Szenarien auf, neben den genannten Szenarien ET II und Df II sind dies vor allem das leicht kontinental ausgeprägte Klima Cf III und das Etesienklima Es.

Diese Ausführungen gelten im Prinzip auch bei Berechnung der Radionuklidkonzentration in Pflanzen nach dem pflanzenspezifischen Modell. Allerdings sind die Strahlenexpositionen dann allgemein niedriger, weil Wurzelgemüse nun nur einen ganz geringen Beitrag liefert. Dies hat zur Folge, dass die für die einzelnen Klima-Szenarien berechneten Strahlenexpositionen noch näher zusammenrücken. Zweite Folge ist, dass der Anteil der durch Genuss von Trinkwasser verabfolgten Dosis steigt, da der Dosisbeitrag des Trinkwassers konstant bleibt. Im erstgenannten Fall - nach dem AVV-Modell - liefert Trinkwasser bei den meisten Radionukliden zwischen 8 % und 20 % der Strahlenexposition, im zweiten Fall (pflanzenspezifisches Modell) zwischen 10 % und 30 %. In beiden Fällen sind die trinkwasserbedingten Anteile durch die kurzlebigen Töchter in den Ketten noch größer, aber bei den Radionukliden, die am leichtesten von Pflanzen und Tieren aufgenommen werden, und bei starken  $\gamma$ -Strahlern kommt es auch vor, dass Trinkwasser nur 0.1 % der Dosis verursacht.

Anders als im Fall, dass Brunnenwasser als Teil der Geosphäre aufgefasst wird, ergibt sich hier eine höhere Strahlenexposition, wenn angenommen wird, dass Weiden nicht berechnet werden. Dies ist die Konsequenz daraus, dass der Ertrag von pflanzlichen Nahrungsmitteln pro Flächeneinheit viel höher ist als der Ertrag von tierischen Nahrungsmitteln. Da die Berechnung von Weiden einen derartig hohen Wasserverbrauch zur Folge hat, dass die Nachhaltigkeit der Landwirtschaft im Allgemeinen stark beeinträchtigt wird, wobei der einzelne Bauer nicht unbedingt einen finanziellen Nutzen hat, wurde die Strahlenexposition auch für den Fall, dass Weiden nicht berechnet werden, berechnet. Es ergeben sich folgende charakteristische Auswirkungen:

Wenn die Radionuklidkonzentration in Pflanzen nach dem Modell der AVV berechnet wird, entsteht bei den meisten Einzelnucliden die höchste Strahlenexposition in den Szenarien Es II b und Cf III b mit nur geringen Unterschieden zwischen den einzelnen Szenarien. Durchschnittlich sieben der 23 weiteren Szenarien haben eine Dosis zur Folge, die mindestens der Hälfte der Dosis im Szenario mit der höchsten Dosis entspricht. Der Beitrag des Genusses von Trinkwasser liegt zwischen 0.2 % und 20 %. Bei den Radionukliden der Ketten verbleibt das Maximum im Szenario ET II, in dem Weiden sowieso nicht berechnet werden, aber der Abstand zwischen den Dosen in den verschiedenen Szenarien verringert sich. In durchschnittlich zehn weiteren Szenarien wird die maximale Dosis zur Hälfte erreicht.

Bei Berechnung der Radionuklidkonzentration in Pflanzen nach dem pflanzenspezifischen Modell ist die Strahlenexposition etwas niedriger, aber ebenso einheitlich. Im Durchschnitt führen im Fall der Einzelnuclide sechs von den 23 weiteren Szenarien zu einer Strahlenexposition in Höhe von mindestens der Hälfte der maximalen Strahlenexposition, im Fall der Kettenglieder zehn. Bei den Einzelnucliden fällt die maximale Strahlenexposition meistens in die Szenarien Es II b und Cf III b, bei den Ketten ist weiterhin meistens das Szenario ET II kritisch. Der Beitrag des Genusses von Trinkwasser liegt bei Einzelnucliden zwischen 0.2 % und 20 %, bei den Gliedern der Ketten meistens zwischen 10 % und 20 %, bei einigen sehr kurzlebigen Kettengliedern werden 50 % überschritten.

## 8 Empfehlungen

### Zusammensetzung der Referenzbiosphäre

Eine Referenzbiosphäre ist eine Sammlung von Annahmen und Hypothesen, die zur Erstellung einer konsistenten Basis für die Berechnung der Strahlenbelastung in der Nachbetriebsphase eines Endlagers notwendig sind. Die Referenzbiosphäre soll möglichst stark vereinfacht sein, aber dennoch alle Expositionspfade enthalten, die zu einer wesentlichen Belastung durch einzelne Radionuklide führen.

Nach Untersuchung von 24 Szenarien, die in der Nachbetriebszeit zeitweise möglich sein können, wird folgende Referenzbiosphäre abgeleitet, die für die meisten relevanten Radionuklide zu einer Strahlenexposition im oberen Bereich der zu erwartenden Exposition führt.

Das Klima ist warm und sommertrocken. Solches Klima hat zwar in Norddeutschland während der letzten Million Jahr nur eine kurze Zeit lang bestanden, bietet aber den Vorteil, dass die radioökologischen Berechnungen auf wenige und gut bekannte Pfade beschränkt werden können.

Eintrittsort der Radionuklide in die Biosphäre ist ein landwirtschaftlich genutzter Brunnen. Diesem Eintrittsort wird der Vorzug gegenüber einer Quelle oder einem Feuchtgebiet gegeben, da davon ausgegangen wird, dass das Quellwasser und der daraus entstehende Bach oder Fluss durch unbelastetes Oberflächenwasser verdünnt ist; im Falle eines Feuchtgebietes ist zu erwarten, dass nur ein geringer Anteil der Nahrung eines Menschen im Feuchtgebiet gewachsen und daher radioaktiv belastet ist.

Die Strahlenexposition ist zu ermitteln für folgende Pfade: Ingestion von Nahrungsmitteln und außerdem von Erde, Inhalation von Schwebstaub und externe Bestrahlung bei Aufenthalt auf berechneten Flächen. Die empfohlenen Verzehrraten gehen zusammen mit der Aufenthaltsdauer auf berechneten Feldern und Weiden im Allgemeinen und bei Vorliegen besonders hoher Staubkonzentration aus Tabelle 8.1 hervor.

Der Nahrungskorb fußt auf den Ernährungsgewohnheiten des Mittelmeerraumes und ist hinsichtlich der Strahlenexposition durch die Gesamtheit der im Endlager verwahrten Radionuklide abdeckend, ohne unrealistisch hohe Verzehrraten zu enthalten.

**Tab 8.1** Empfohlene Verzehrraten und Aufenthaltsdauern in belasteten Gebieten

Nahrungsmittel	l/a bzw. kg/a	Aufenthaltsort	h/a
Trinkwasser	1000	Feld (Inhalation)	30
Milch	60	Feld ( $\gamma$ -Strahlung)	1700
Fleisch	40		
Pflanzliche Nahrungsmittel	660		
Erde	0.2		

Dieser Nahrungskorb ist stark vereinfacht und besteht überwiegend aus pflanzlichen Nahrungsmitteln, da die Konzentration der meisten und radiologisch bedeutendsten Radionuklide in pflanzlichen Nahrungsmitteln höher als in tierischen ist. Aus demselben Grund werden weder Pflanzen aus Überschwemmungsgebieten noch aus Treibhäusern in den Nahrungskorb aufgenommen, auch die Tiere weiden nicht in Überschwemmungsgebieten. Der Nahrungskorb enthält keine Fische, denn diese leben nicht im Brunnenwasser, und auch ein von einer Quelle gespeister Bach bietet zu wenig Lebensraum für die benötigten Fische, so dass die Anreicherung der Radionuklide in Fischen durch eine starke Verdünnung im Vorfluter ausgeglichen wird.

### **Berechnungsmethoden**

Die Berechnungsmethoden fußen im Wesentlichen auf der AVV /BMU 01/, dabei werden einige Streichungen, Änderungen und Ergänzungen vorgenommen.

- ◆ Pflanzliche Nahrungsmittel: Alle der menschlichen Ernährung dienenden Pflanzen werden gleich behandelt. Die Formeln der AVV gelten, abweichende Parameterwerte gehen aus Tabelle 8.2 hervor.
- ◆ Tierische Nahrungsmittel: Der Nahrungskorb (Tabelle 8.1) enthält sowohl Milch als auch Fleisch, weil die Transferfaktoren für Milch und Fleisch bei einigen wichtigen Radionukliden um Größenordnungen differieren. Die Aufnahme von Erde durch weidende Tiere wird berücksichtigt, siehe Tabelle 8.2.
- ◆ Erde: Zusätzlich zur AVV sollte die Ingestion von Erde berücksichtigt werden.
- ◆ Inhalation bei staubbelasteter Feldarbeit: Die AVV wird um diesen Pfad ergänzt. In Tabelle 8.1 ist die Dauer der Staubinhalation höher als in

Abschnitt 6 ausgewiesen wird, weil die Inhalation von Wasserdampf im Treibhaus pauschal durch einen Zuschlag berücksichtigt wird.

- ◆ Externe Bestrahlung bei Aufenthalt auf beregneten Feldern: Die AVV wird um diesen Pfad ergänzt.

**Tab. 8.2** Parameterwerte zur Berechnung des Radionuklidtransports über den Ingestionspfad und den Inhalationspfad

Symbol	Definition	Wert
$\lambda_{M,r}$	Verweilkonstante der Radionuklide aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten und anderer Abbauvorgänge - für Tc - für Sr, Ru, I - für Cs und Aktiniden	Für Acker und Weide $1 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ $5 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ $1 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$
$M_{\text{Boden}}^{\text{Rind}}$	tägliche Aufnahme von Erde durch Rindvieh	0.5 kg/d
$p^m$	Flächentrockenmasse des Bodens $m = A$ (Ackerboden) = $Wd$ (Weideboden) Relevante Tiefe: 50 cm	650 kg/m <sup>2</sup>
$t_b$	Zeit, in der sich die Radionuklide auf dem Boden ablagern: unendlich	Unendlich
$t_R^m$	Zahl der Tage im Jahr, an denen beregnet wird $m = A$ (Acker) $m = Wd$ (Weide)	120 d 180 d
$t_v^n$	Zeit zwischen Produktion und Verbrauch von Nahrungs- bzw. Futtermitteln $n = Pf = Bl$ (alle pflanzlichen Nahrungsmittel)	$5 \cdot 10^6 \text{ s}$
$W^m$	Beregnungsrate während der Weidezeit und der Wachstumszeit von pflanzlichen Produkten $m = A$ (Acker) $m = Wd$ (Weide)	$4 \cdot 10^{-5} \text{ l}/(\text{m}^2 \text{ s})$ $2.5 \cdot 10^{-5} \text{ l}/(\text{m}^2 \text{ s})$
$Y^n$	Ertrag bzw. Bewuchsdichte (Frischmasse) $n = Pf = Bl$ $n = Wd$	2 kg/m <sup>2</sup> 0.85 kg/m <sup>2</sup>
$C_L^{\text{Staub}}$	Konzentration von Staub in der Luft bei staubbelasteten Arbeiten wie Pflügen	$2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/\text{m}^3$
$U^{\text{Luft}}$	Atemrate beim Pflügen	1.2 m <sup>3</sup> /h

In der obigen Tabelle sind die nuklidspezifischen Parameterwerte nicht enthalten. Diese befinden sich in Tabelle 6.9 für den Übergang von Radionukliden in Kuhmilch und Rindfleisch und in Tabelle 6.25 für den Übergang aus dem Boden in Weidebewuchs ( $T_r^W$ ) und andere Pflanzen ( $T_r^P$ ). Diese Transferfaktoren decken das gewichtete

tete Paket der zum menschlichen Verzehr bestimmten Pflanzenteile ab, nur im Fall von Tc ergibt sich bei adäquater Wichtung ein etwas höherer Transferfaktor.

Alle Formeln bis auf wenige Ausnahmen werden in der AVV /BMU 01/ angegeben, dabei sei besonders auf die Formeln für den Aufbau von Tochternukliden im Boden hingewiesen. Über die AVV hinaus gehen folgende Formeln:

- ◆ Ingestion von Milch und Fleisch, wenn die Tiere Erde aufgenommen haben. Dabei ist die Radionuklidkonzentration im Boden von berechneten Weiden nach Formel 5.7.4 zu berechnen, der Übergang in Milch und Fleisch analog zu Formel 5.6.1.
- ◆ Direkte Ingestion von Erde durch den Menschen. Formel 5.7.4 gibt die Radionuklidkonzentration im berechneten Ackerboden an.
- ◆ Inhalation von resuspendierten Radionukliden. Formel 5.12.1 gibt die Radionuklidkonzentration in der bodennahen Luft beim Pflügen und bei anderen staubbelasteten Arbeiten an.
- ◆ Aufenthalt auf berechneten Feldern. Die Berechnung der flächenbezogenen Aktivität der Radionuklide auf berechneten Flächen erfolgt nach Formel 5.14.4

Die so Vorschriften berechnete Strahlenexposition ist für die relevanten Radionuklide abdeckend. Ein Szenario, in dem die Exposition durch jedes einzelne Radionuklid maximal ist, existiert nicht, aber die berechnete Strahlenexposition ist recht robust gegenüber Umwelteinflüssen: Im Falle der meisten Radionuklide wird mindestens die Hälfte der maximalen Strahlenexposition in fünf bis zehn von 23 weiteren Szenarien erreicht. Diese anderen Szenarien enthalten jedoch einige Expositionspfade, für die keine anerkannten Berechnungsgrundlagen vorliegen, und einige Medien, für die wichtige Parameterwerte nicht bekannt sind, sind mithin mit Unsicherheiten behaftet.

Es ist nicht möglich, die Biosphäre so stark zu vereinfachen, dass nur noch der Trinkwasserpfad berücksichtigt wird, denn der Beitrag des Trinkwassers ist in Abhängigkeit vom Radionuklid sehr variabel und nimmt Werte zwischen weniger als 0.1 % und mehr als 30 % der Gesamtdosis an. Daher werden keine sinnvollen Ergebnisse auf der Basis des Trinkwasserverzehrs allein erhalten.

## 9 Zusammenfassung

Eine Referenzbiosphäre ist eine Sammlung von Annahmen und Hypothesen, die zur Erstellung einer konsistenten Basis für die Berechnung der Strahlenbelastung in der Nachbetriebsphase eines Endlagers notwendig sind. Die Referenzbiosphäre soll möglichst stark vereinfacht sein, aber dennoch alle Expositionspfade enthalten, die zu einer wesentlichen Belastung durch einzelne Radionuklide führen.

Zur Ableitung von Empfehlungen für eine Referenzbiosphäre wurden die während der Nachbetriebsphase mit hoher Wahrscheinlichkeit zeitweilig auftretenden Klimabedingungen untersucht. Für jedes Klima wurden in sich konsistente Biosphären, hauptsächlich bestehend aus Klima, Boden, Pflanzen und Tieren, entworfen. Auf dieser Basis wurde die effektive Strahlenexposition eines Erwachsenen bei verschiedenen Ernährungs- und Produktionsweisen berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass mehrere Szenarien zu einer Strahlenexposition in gleicher Größenordnung führen. Dabei ist das Szenario mit der maximalen Strahlenexposition radionuklidabhängig. Es wird als Referenzbiosphäre eine Biosphäre mit Mittelmeerklima vorgeschlagen, in der die Ernährung überwiegend auf pflanzlicher Basis beruht.

Folgende Pfade sollten berücksichtigt werden:

- ◆ Ingestion von Trinkwasser, pflanzlichen Nahrungsmitteln, Fleisch, Milch und Erde
- ◆ Inhalation von resuspendierten Radionukliden
- ◆ Aufenthalt auf berechneten Feldern

Weitere Biosphären, in denen ungefähr die gleiche Strahlenexposition auftreten kann, sind ebenfalls möglich; sie sind jedoch komplexer aufgebaut und daher mit größeren Unsicherheiten behaftet. Eine Biosphäre, in der die Strahlenexposition durch jedes einzelne Radionuklid maximal ist, existiert nicht.

Es ist nicht sinnvoll, die Biosphäre so stark zu vereinfachen, dass nur noch der Trinkwasserpfad berücksichtigt wird, denn der relative Beitrag des Trinkwassers ist in Abhängigkeit vom Radionuklid sehr variabel.



## Verzeichnisse

### 9.1 Symbolverzeichnis

Ae	Aschhorizont, ausgebleichter Horizont im Podsolboden
Ah	nicht bearbeiteter Humushorizont, im Wald unter der Humusaufgabe, unter Weiden unter dem Wurzelfilz, unter Äckern unter dem Pflughorizont
A-Horizont	Organische Bodenhorizonte einschließlich der Auflage und humose Oberbodenhorizonte
Al	Tonauswaschungshorizont, ausgebleichter Horizont in Fahlerden
B-Horizont	Mineralische braune Unterbodenhorizonte
$B_{Pflanze}^{Klima}$	Berechnungsmenge bei der letzten Berechnung der verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen vor der Ernte ( $l/m^2$ )
Bh	Humushüllenhorizont, Horizont im Podsolboden, in dem ausgewaschener Humus eingewaschen wird
Bs	Rosthüllenhorizont, Horizont im Podsolboden, in dem ausgewaschene Kationen ausgefällt werden
Bt	Brauner Tonhäutchenhorizont, typischer Unterboden in Fahl- und Parabraunerden
$C_{Geo,b1}$	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson für die Energiegruppe 1
$C_{Geo,b2}$	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Körpergeometrie der Referenzperson für die Energiegruppe 2
$C_r^{BW}$	Konzentration des Radionuklids r im Brunnenwasser (Bq/l)

Cf	Feuchtgemäßigtes Klima
$C_r^{\text{Fisch}}$	Konzentration des Radionuklids r in zubereitetem Fisch (Bq/kg)
$C_r^{\text{Fließ}}$	Konzentration des Radionuklids r im Fließgewässer (Bq/l)
$C_r^{\text{Klima,Luft}}$	Konzentration des Radionuklids r in der Atemluft (Bq/m <sup>3</sup> )
$C_L^{\text{Klima,Staub}}$	Staubgehalt in der bodennahen Luft während besonders staubbelasteter Feldarbeit unter den verschiedenen Klimabedingungen (kg/m <sup>3</sup> )
$C_{r,Klima}^m$	Konzentration des Radionuklids r im Boden m unter den verschiedenen Klimabedingungen (Bq/kg)
$C_r^{\text{Nahrung}}$	Konzentration des Radionuklids r im Lebensmittel Nahrung (Bq/kg)
$C_r^{\text{Pflanze}}$	Konzentration des Radionuklids r in der Pflanze (allgemein) (Bq/kg)
$C_r^{\text{Sch}}$	Konzentration des Radionuklids r im Schwebstoff (Bq/kg)
$C_r^{\text{Trinkwasser}}$	Konzentration des Radionuklids r im Trinkwasser (Bq/l)
$C_r^{\text{Tier}}$	Konzentration des Radionuklids r in den tierischen Produkten Milch und Fleisch (Bq/kg)
$C_r^{\text{Üboden}}$	Konzentration des Radionuklids r im Boden des Überschwemmungsgebietes (Bq/kg)
$C_r^{\text{Weide}}$	Konzentration des Radionuklids r in frischem Weidebewuchs (Bq/kg)
C-Horizont Mineralischer Unterbodenhorizont	
Cs	Etesienklima, Mittelmeerklima

$d_m^{\text{Klima}}$	Stärke des gut durchwurzelten Bodens ( $m=A=Acker$ , $m=W=Weide$ ) unter unterschiedlichen Klimabedingungen ( $m$ )
$D_r$	Dekontaminationsfaktor, der das Verhältnis der Radionuklidkonzentration in der Luftfeuchtigkeit eines Treibhauses zur Radionuklidkonzentration im Beregnungswasser angibt
$D_f$	Feuchtwinterkaltes Klima, boreales Nadelwaldklima
$D_w$	Transbaikalisches Klima, trockenwinterkaltes Klima, hochkontinentales winterkaltes Klima
$\epsilon_{t,m}^{\text{Klima}}$	Gesamtporosität des Bodens $m$ ( $A=Acker$ , $W=Weide$ ) unter den unterschiedlichen Klimabedingungen
$EF$	Klima des ewigen Frostes
$ET$	Tundrenklima
$f_r^{\text{abs}}$	Anteil der auf die äußeren Pflanzenteile abgelagerten Radioaktivität, der in die Blätter hineingelangt
$f_w^{\text{Pflanze}}$	Anteil der auf der Pflanze bzw. dem zum Verzehr bestimmten Pflanzenteil bei Beregnung abgelagerten Aktivität
$f_u^{\text{Substrat}}$	Faktor zur Berücksichtigung der Geometrie der Flächenquelle auf dem Substrat Boden oder Sediment
$f_{r,Pflanze}^{\text{trans}}$	Anteil des absorbierten Radionuklids $r$ , der in das zum Verzehr bestimmte Pflanzenorgan gelangt
$f_p$	Anteil des Jahres, in dem das Rind frisches Weidefutter erhält
$f_r$	Anteil des Gammaemissionsspektrums des Radionuklids $r$ oberhalb der Energie 0.2 MeV

$f_w$	Anteil der bei Berechnung von den Pflanzen zurückgehaltenen Radioaktivität
FEP	Features, Events, Processes. Eine Methode, Transportvorgänge von Radionukliden im Biosphärennetz verbal zu beschreiben. In den diagonal angeordneten Feldern einer Matrix werden die verschiedenen Umweltmedien angegeben, in den übrigen Feldern die Vorgänge, durch die Radionuklide in andere Kompartimente transportiert werden können.
FM	Frischmasse
$g_{b,r,T}$	Dosisleistungsfaktor für die äußere Bestrahlung des Organs oder Gewebes T durch das Radionuklid r (Sv/s : Bq/m <sup>2</sup> )
$g_{g,r,T}$	Ingestionsdosisfaktor für das Radionuklid r im Organ oder Gewebe T (Sv/Bq)
$g_{h,r,T}$	Inhalationsdosisfaktor für das Radionuklid r im Organ oder Gewebe T (Sv/Bq)
H	jährliche Strahlenexposition (Sv/a)
$H_{T,g,r}^{Luft}$	jährliche Strahlenexposition des Organs oder Gewebes T durch Inhalation des Radionuklids r aus der Luft (Sv/a)
$H_{T,g,r}^{Nahrung}$	jährliche Strahlenexposition des Organs oder Gewebes T durch Aufnahme des Radionuklids r mit der Nahrung (Sv/a)
$H_{T,g,r}^{Substrat}$	jährliche Strahlenexposition des Organs oder Gewebes T durch Aufenthalt auf dem Substrat Boden oder Sediment, das mit dem Radionuklid r belegt ist (Sv/a)
HQ	Abfluss des Fließgewässers bei Hochwasser (m <sup>3</sup> /s)

$K_e^r$	Übergangskonstante aus dem Wasser ins Sediment für das Radionuklid r (l/(m <sup>2</sup> s))
$K_F^r$	Konzentrationsfaktor für das Radionuklid r im Sediment (Bq/kg Sediment : Bq/l Wasser)
L	Auflagestreu, Bodenhorizont aus wenig zersetzter Pflanzensubstanz
$L_{Tier}^{Klima}$	tägliche Wasseraufnahme des Tieres (Rind oder Ren) in Abhängigkeit vom Klima (l/d)
$\lambda_{Dep,m}^{Klima}$	scheinbare Verweilkonstante der Radioaktivität im Boden m unter unter- schiedlichen Klimabedingungen durch Verdünnung in Folge Deposition von unkontaminierten Bodenteilchen (s <sup>-1</sup> )
$\lambda_{E,m}^{Klima}$	Verweilkonstante der Radioaktivität im Boden m unter unterschiedlichen Klimabedingungen in Folge Erosion mit Wind und Wasser (s <sup>-1</sup> )
$\lambda_{eff,r,m}^{Klima}$	effektive Verweilkonstante des Radionuklids r im Boden m unter den un- terschiedlichen Klimabedingungen (s <sup>-1</sup> ) $\lambda_{eff,r,m}^{Klima} = \lambda_r + \lambda_{M,r,m}^{Klima} + \lambda_{Dep,m}^{Klima} + \lambda_{N,m}^{Klima} + \lambda_{E,m}^{Klima}$
$\lambda_{eff,r,Pflanze}^{Klima}$	effektive Verweilkonstante des Radionuklids r für das Verbleiben auf den zum Verzehr bestimmten Pflanzenteilen unter unterschiedlichen Klimabe- dingungen (s <sup>-1</sup> ) $\lambda_{eff,r,Pflanze}^{Klima} = \lambda_r + \lambda_{v,Pflanze}^{Klima}$
$\lambda_{M,r,m}^{Klima}$	Verweilkonstante des Radionuklids r im Boden m unter verschiedenen Klimabedingungen durch Migration in tiefere Bodenschichten (s <sup>-1</sup> )
$\lambda_{N,m}^{Klima}$	scheinbare Verweilkonstante der Radioaktivität im Boden m unter unter- schiedlichen Klimabedingungen durch Verdünnung in Folge Verwitterung des Ausgangsgesteins und Neubildung von Boden (s <sup>-1</sup> )

$\lambda_{r,m}^{\text{Klima}}$	Verweilkonstante des Radionuklids r im Boden m unter verschiedenen Klimabedingungen ( $s^{-1}$ )
$\lambda_{v,\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$	Verweilkonstante für das Verbleiben der Radioaktivität auf den zum Verzehr bestimmten Pflanzenteilen unter unterschiedlichen Klimabedingungen ( $s^{-1}$ )
$\lambda_{eff,r}^{\ddot{u}}$	effektive Abbaukonstante für Radionuklide im Boden des Überschwemmungsgebietes ( $s^{-1}$ ) $\lambda_{eff,r}^{\ddot{u}} = \lambda_r + \lambda_{\ddot{u}}$
$\lambda_r$	radiologische Abbaukonstante ( $s^{-1}$ )
$\lambda_{\ddot{u}}$	Abbaukonstante zur Berücksichtigung des Eindringens der Radionuklide in tiefere Bodenschichten in Überschwemmungsgebieten ( $s^{-1}$ )
$M_{Fu}^{\text{Tier}}$	tägliche Aufnahme von Frischfutter durch das Tier (Ren bzw. Rind) (kg/d)
$M_{\ddot{u}\text{boden}}^{\text{Tier}}$	tägliche Aufnahme von Boden aus dem Überschwemmungsgebiet durch das Tier (Ren bzw. Rind) (kg/d)
$M_{eff,r,m}^{\text{Klima}}$	effektive Migrationsrate des Radionuklids r im Boden m unter den unterschiedlichen Klimabedingungen (m/a)
MQ	mittlerer Abfluss des Fließgewässers ( $m^3/s$ )
$O_{r,m}^{\text{Klima}}$	Belegung des berechneten Bodens m mit dem Radionuklid r unter unterschiedlichen Klimabedingungen ( $Bq/m^2$ )
$O_r^{\text{Substrat}}$	Belegung des Bodens oder Sediments Substrat in den obersten 5 cm mit dem Radionuklid r ( $Bq/m^2$ )

$O_{r,m}^{\text{Üboden}}$	Belegung der obersten 5 cm des Überschwemmungsgebietes ( $m=A$ für Acker, $m=W$ für Weide) durch das Radionuklid $r$ ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )
Of	Fermentationshorizont, Bodenhorizont mit Pflanzenresten
Oh	Humusstoffhorizont, Bodenhorizont aus stark zersetzten humosen Substanzen
O-Horizont	Horizont der organischen Auflage über dem Mineralboden (soweit nicht Torf)
$\rho^m$	Flächentrockenmasse des Bodens im Überschwemmungsgebiet ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) für Äcker ( $m=A$ ) und Weiden ( $m=W$ )
$\rho_m^{\text{Klima}}$	Flächentrockenmasse des Bodens, in dem die eingetragenen Radionuklide homogen verteilt sind, unter unterschiedlichen Klimabedingungen ( $m=A=A$ cker, $m=W=W$ eide) ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
$Q^{\text{Haushalt}}$	Wasserverbrauch im Haushalt, der über einen Brunnen gedeckt und nach Gebrauch in ein Fließgewässer eingeleitet wird
$\rho_{\text{Boden}}$	Lagerungsdichte der mineralischen Bodenpartikel ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_{\text{Se}}$	Dichte des Sediments (Trockenmasse) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$T_r^{\text{Beere}}$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden des Überschwemmungsgebietes in Beeren ( $\text{Bq}/\text{kg}$ Beeren : $\text{Bq}/\text{kg}$ Boden)
$T_r^{\text{B}}$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden in frisches Blattgemüse ( $\text{Bq}/\text{kg}$ Blattgemüse : $\text{Bq}/\text{kg}$ Boden)
$T_r^{\text{Fi}}$	Konzentrationsfaktor für den essbaren Teil von Fischen bezogen auf ungefiltertes Wasser ( $\text{Bq}/\text{kg}$ Fisch : $\text{Bq}/\text{l}$ Wasser)

$T_r^G$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden in frisches Getreide (Bq/kg Getreide : Bq/kg Boden)
$T_r^K$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden in frisches Wurzelgemüse und Kartoffeln (Bq/kg Wurzelgemüse : Bq/kg Boden)
$t_b^{Klima,Pflanze}$	Zeit zwischen der letzten Beregnung der verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen und der Ernte (s)
$t_v^{Klima,Pflanze}$	Zeit zwischen Ernte und Verzehr der verschiedenen Pflanzen unter den verschiedenen Klimabedingungen (s)
$t_w^{Klima,Pflanze}$	Zeit, in der die verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen durch Beregnung oberflächlich kontaminiert werden
$T_r^{Kuhmilch}$	Transferfaktor zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Futter in Kuhmilch (d/kg)
$t_v^{Lf}$	Zeit zwischen Ernte des Lagerfutters und der Verfütterung (s)
$t_v^{Nahrung}$	Zeit zwischen Melken und Verzehr der Milch bzw. zwischen Schlachtung und Verzehr des Fleisches von Rentieren und Rindern (s)
$T_r^O$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden in frisches Obst und Fruchtgemüse (Bq/kg Obst : Bq/kg Boden)
$T_r^P$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden in Pflanzen (allgemeiner Nahrungskorb) (Bq/kg Pflanzen (FM) : Bq/kg Boden)
$T_r^{Pilz}$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids $r$ aus dem Boden des Überschwemmungsgebietes in Pilze (Bq/kg Pilze : Bq/kg Boden)



$T_R^{\text{Pflanze, Klima}}$	Dauer der jährlichen Berechnungszeit für die verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen (d)
$T_r^{\text{Rentierfleisch}}$	Transferfaktor zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Futter in Rentierfleisch (d/kg)
$T_r^{\text{Rentiermilch}}$	Transferfaktor zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Futter in Rentiermilch (d/kg)
$T_r^{\text{Rindfleisch}}$	Transferfaktor zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Futter in Rindfleisch (d/kg)
$T_r^{\text{Tier}}$	Transfer des Radionuklids r aus dem Futter in das tierische Produkt Milch und Fleisch für Rentiere und Rinder (d/kg)
$T_r^W$	Transferfaktor für den Übergang des Radionuklids r aus dem Boden in frischen Weidebewuchs (Bq/kg Weide : Bq/kg Boden)
$t_b$	Zeit, in der sich die Radionuklide im Boden anreichern (s)
$t_{se}$	Sedimentationszeit bis das Sediment 5 cm stark ist (s)
TM	Trockenmasse
$U_{\text{Fließ}}^{\text{Fisch}}$	jährliche Aufnahme von Fisch aus dem vom Endlager beeinflussten Fließgewässer (kg/a)
$U_{\text{Gesamt}}^{\text{Fisch}}$	gesamte jährliche Aufnahme von Fisch (kg/a)
$U^{\text{Luft}}$	Atemrate (m <sup>3</sup> /a)
$U_m^{\text{Üboden}}$	Stärke des gut durchwurzelten Bodens m (m=A für Ackerland, m=W für Weideland) im Überschwemmungsgebiet

$U^{\text{Nahrung}}$	jährliche Aufnahme des Lebensmittels Nahrung (kg/a)
$U_{\text{Klima}}^{\text{Trinkwasser}}$	jährlicher Verbrauch von Trinkwasser unter den verschiedenen Klimabedingungen (l/a)
$U_r$	effektive Schichtdicke des Sedimentes (m)
$V_{\text{Se}}$	Sedimentationsgeschwindigkeit (m/s)
$W_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$	Berechnungsrate während der Weidezeit bzw. der Wachstumszeit von Pflanzen je nach Pflanzenkategorie und Klima (l/(m <sup>2</sup> s))
$y_{\text{Pflanze}}^{\text{Klima}}$	Gesamtertrag der oberirdischen Teile der verschiedenen Pflanzen unter unterschiedlichen Klimabedingungen (kg/m <sup>2</sup> )
$y_{\text{Pflanzenorgan}}^{\text{Klima}}$	Ertrag des zum Verzehr bestimmten Pflanzenorgans unter den verschiedenen Klimabedingungen (kg/m <sup>2</sup> )
$Z^{\text{Substrat}}$	Aufenthaltsdauer auf dem Boden oder Sediment Substrat (s/a)

## 9.2 Literaturverzeichnis

- /ANT 95/ M. Antonopoulos-Domis, A. Clouvas, A. Hiladakis, S. Kadi  
Radiocesium Distribution in Undisturbed Soil: Measurements and Diffusion-Advection Model  
Health Physics, 69 (1995), S. 949-953
- /BAGS 95/ Behörde für Arbeit, Gesundheit und Soziales, Hamburg  
Standards zur Expositionsabschätzung  
BAGS 1995
- /BAR 98a/ V. SH. Barcan, E. F. Kovnatsky, M. S. Smetannikova  
Absorption of Heavy Metals in Wild Berries and Edible Mushrooms in an Area Affected by Smelter Emissions  
Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 103, S. 173-195, 1998
- /BAR 98b/ V. Barcan, E. Kovnatsky  
Soil Surface Geochemical Anomaly around the Copper-Nickel Metallurgical Smelter  
Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 103, S. 197-218, 1998
- /BEC 96/ A. Becker, H. Fischer, E. Hofer, M. Kloos, B. Krzykacz, K.-H. Martens, K.-J. Röhlig  
**E**valuation of **E**lements **R**esponsible for the effective **E**ngaged dose rates associated with the final **S**Torage of radioactive waste: EVEREST Project  
Volume 3a: Salt formation, site in Germany  
EUR 17449/3a EN, 1996
- /BFS 00/ Bundesamt für Strahlenschutz  
Datensätze mit Dosisfaktoren für Ingestion und Inhalation sowie Dosisleistungsfaktoren für Gamma-Submersion und Beta-Submersion  
Durch BfS am 22. 06. 2000 an GRS übergeben im Vorgriff auf die in Vorbereitung befindliche Revision von /BMU 89a/  
e-mail vom 22. 06. 2000 (Dr. Thiel an die GRS)

- /BIO 99a/ BIOMASS  
Long-Term Releases from Solid Waste Disposal Facilities: The Reference  
Biosphere Concept  
Working Material, Draft TECDOC Theme 1, Working Document:  
BIOMASS/T1/WD01  
Reproduced by the IAEA, 1999
- /BIO 99b/ BIOMASS  
Guidance for the Application of Data to Assessment Models  
Working Material, Draft TECDOC Theme 1, Working Document:  
BIOMASS/T1/WD04  
Reproduced by the IAEA, 1999
- /BMU 89/ Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Zusammenstellung der Dosisfaktoren  
Bundesanzeiger Nummer 185a, 30. September 1989
- /BMU 90/ Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Er-  
mittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus  
kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen vom 21. Februar 1990  
Bundesanzeiger Nummer 64a, 31. März 1990
- /BMU 94/ Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Bekanntmachung einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission (Neu-  
fassung der "Berechnung der Strahlenexposition") vom 29. Juni 1994 Bun-  
desanzeiger Nummer 222a, 26. November 1994
- /BMU 95/ Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Umweltpolitik  
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung  
Jahresbericht 1995

- /BMU 99/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Umweltpolitik  
Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge  
bergbaubedingter Umweltradioaktivität  
(Berechnungsgrundlagen – Bergbau)  
30. 7. 1999
- /BMU 01/ Novellierung der AVV zu § 47 StrlSchV (neu)  
Fassung 1: Effektive Dosis und Organdosen  
Entwurf von BfS, SH 3.3, Stand 10. 01.2001
- /BRI 98/ C. Brickell  
DuMont' s grosse Garten-Enzyklopädie  
DuMont Buchverlag, Köln 1998
- /BUN 95a/ K. Bunzl, W. Kracke, W. Schimmack, K. Auerwald  
Migration of  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the Various Horizons of a Forest  
Soil Under Pine  
J. Environ. Radioactivity, 28 (1995), 17-34
- /BUN 95b/ K. Bunzl, H. Kofuji, W. Schimmack, A. Tsumura, K. Ueno, M. Yamamoto  
Residence Times of Global Weapons testing Fallout  $^{237}\text{Np}$  in a Grassland  
Soil Compared to  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$   
Health Physics 68 (1995), S. 89-93
- /COU 85/ P. J. Coughtrey, D. Jackson, M. C. Thorne  
Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosys-  
tems  
A. A. Balkema, Rotterdam, Boston, 1985
- /DGJ 90/ Freie und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde, Strom- und Hafен-  
bau (Herausgeber)  
Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch  
Elbegebiet, Teil III, 1990

- /ENN 89/ M. E. Ennis, J. E. Johnson, G. M. Ward, K. N. Boamah  
Technetium Metabolism by Lactating Cows  
Health Physics 57 (1989), S. 321-330
- /ENZ 80/ Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik  
Verlag Moderne Industrie, 1980
- /GEI 88/ G. Geisler  
Pflanzenbau  
Paul Parey, 1988
- /GRE 97/ N. Green et al.  
Transfer of Radionuclides to Fruit  
Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 226, S. 195-200 (1997)
- /GRZ 68/ B. Grzimek  
Grzimeks Tierleben  
13. Band, Säugetiere 4  
Kindler Verlag, 1968
- /HE 97/ Q. He, D. E. Walling  
The Distribution of Fallout  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in Undisturbed and Cultivated  
Soils  
Appl. Radiat. Isot. 48 (1997), S. 677-690
- /HEN 97/ M. Hendl, H. Liedtke (Herausgeber)  
Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie  
Justus Perthes Verlag Gotha, 1997
- /HÖL 00/ Z. Hölgye, M. Malý  
Sources, vertical distribution, and migration rates of  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ , and  
 $^{137}\text{Cs}$  in grassland soil in three localities of central Bohemia  
J. Environ. Radioactivity 47 (2000), S. 135-147

- /HOR 96/ H. Horvath, M. Kasahara, P. Pesava  
The Size Distribution and Composition of the Atmospheric Aerosol at a Rural and Nearby Urban Location  
J. Aerosol Sci. 27 (1996), 417-435
- /HÜB 95/ R. Hübener  
Die Geschichte der Beregnung – Teil 1  
Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft, 30. Jahrgang, Seite 147-162, 1995
- /HUI 97/ A. S. Huijzer, R. F. B. Isarin  
The reconstruction of past climates using multi-proxy evidence: an example of the Weichselian Pleniglacial in Northwest and central Europe  
Quaternary Science Reviews, Vol. 16, S. 313-533, 1997
- /IAEA 94/ International Atomic Energy Agency  
Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments  
IAEA TECHNICAL Reports Series No. 364, 1994
- /IAEA 96/ International Atomic Energy Agency  
Validation of Models Using Chernobyl Fallout Data from Southern Finland Scenario S  
Second Report of the VAMP Multiple Pathways Assessment Working Group  
IAEA-TECDOC-904, 1996
- /ICRP 74/ International Commission on Radiological Protection  
Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste  
ICRP Publication No. 23  
Pergamon Press, 1974
- /ICRP 85a/ International Commission on Radiological Protection  
Principles of Monitoring for the Radiation Protection of the Population  
ICRP Publication No. 43  
Annals of the ICRP, Vol. 15, No. 1, 1985

- /ICRP 85b/ International Commission on Radiological Protection  
 Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Active Waste  
 ICRP Publication No. 46  
 Annals of the ICRP, Vol. 15, No. 4, 1985
- /ICRP 98/ International Commission on Radiological Protection  
 Report of the Task Group on Reference Man  
 ICRP Publication No. 77  
 Annals of the ICRP, Vol. 27, Supplement 1997, 1998
- /INJ 98/ J. Injuk, R. van Grieken, G. de Leeuw  
 Deposition of Atmospheric Trace Elements into the North Sea: Coastal,  
 Ship, Platform Measurements and Model Predictions  
 Atmospheric Environment 32 (1998), 3011-3025
- /JAF 88/ J.-L. Jaffrezo, J.-L. Colin  
 Rain-Aerosol Coupling in Urban Area: Scavenging Ratio Measurement  
 and Identification of some Transfer Processes  
 Atmospheric Environment 22 (1988), 929-935
- /KRI 74/ Th. Krist  
 Grundwissen Umweltschutz  
 Zahlen Daten Fakten Bestimmungen  
 Technik-Tabellen-Verlag Finkentscher & Co, 1974
- /KWU 78/ Kraftwerk Union Aktiengesellschaft  
 Sicherheitsbericht Kernkraftwerk Emsland mit Druckwasserreaktor, elektri-  
 sche Leistung 1300 MW  
 für Kernkraftwerk Lippe – Ems GmbH Dortmund, Band 1 1. – 1.11  
 1978
- /LEE 00/ M. H. Lee, C. W. Lee  
 Association of fallout-derived  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$  with natural organic  
 substances in soils  
 J. Environ. Radioactivity 47 (2000), S. 253-262



- /LÖH 76/ L. Löhr  
Faustzahlen für den Landwirt  
Leopold Stocker Verlag, Graz, 1976
- /LOR 96/ R. Lorenzelli, A. Zambonelli, F. Serra, A. Lamma  
<sup>137</sup>Cs Content in the Fruit Bodies of Various Tuber Species  
Health Physics, Vol. 71, S. 956-959, 1996
- /MAK 91/ F. Makeschin  
Einfluß von Kalkung und CaSO<sub>4</sub>-Düngung auf die bioturbativen  
Leistungen von Regenwürmern in einem saurem Kiefernwaldboden  
Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch., 66, I, 559-562 (1991)
- /MAK 94/ F. Makeschin  
Experimentelle Untersuchungen zur Besiedelung anthropogen devastier-  
ter, saurer Waldböden mit leistungsfähigen Lumbriciden  
Akademischer Verlag München, 1994
- /MAT 00/ J. Matschullat, W. Maenhaut, F. Zimmermann, J. Fiebig  
Aerosol and Bulk Deposition Trends in the 1990s, Eastern Erzgebirge,  
Central Europe  
Atmospheric Environment 34 (2000) 3213-3221
- /MÜL 81/ K. Müller-Hohenstein  
Die Landschaftsgürtel der Erde  
Teubner Studienbücher Geographie, 1981
- /MÜL 96/ H. Müller-Lemans, F. v. Dorp  
Bioturbation as a Mechanism for Radionuclide Transport in Soil: Rele-  
vance of Earthworms  
J. Environmental Radioactivity, Bd. 31 (1996), S. 7-20
- /NAL 96/ S. Nalezinski, W. Rühm, E. Wirth  
Development of a general equation to determine the transfer feed-to-meat  
for radiocesium on the basis of the body mass of domestic animals  
Health Physics 70 (1996), 717-721

- /PRÖ 95/ G. Pröhl, H. Biesold, A. Becker  
Vorschläge zur Veränderung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur  
Berechnung der potentiellen Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase  
von Endlagern  
130. Sitzung des Ausschusses Radioökologie der SSK, 16./17. 11. 1995
- /RIC 98/ G. Richter (Herausgeber)  
Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems  
Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1998
- /ROE 94/ W. Roedel  
Physik unserer Umwelt  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo,  
Hong Kong, Barcelona, Budapest 1994
- /RÖS 76/ H. J. Rösler, H. Lange  
Geochemische Tabellen  
2. Auflage  
Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1976
- /ROT 93/ K. Rother  
Mediterrane Subtropen  
Westermann Schulbuchverlag, 1993
- /ROU 84/ S. Roussel et al.  
Facteurs de Transfert sol-plante: Mesures in situ (90Sr et 137Cs-Mesures  
de points zeros)  
in: Illrd Report of the Workgroup on Soil-to-Plant Transfer Factors  
Prepared by RIVM, Bilthoven, The Netherlands, S. 81-87 (1984)
- /RÜH 98/ W. Rühm, M. Steiner, L. Kammerer, L. Hiersche, E. Wirth  
Estimating Future Radiocesium Contamination of Fungi on the Basis of  
Behaviour Pattern Derived from Past Instances of Contamination  
J. Environ. Radioactivity Vol. 39, S. 129-147, 1998

- /RUH 85/ RUHR-STICKSTOFF AKTIENGESELLSCHAFT  
Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau  
Verlagsunion Agrar, 10. Auflage, 1985
- /SCH 86/ W. Schmidt, Th. Liese, Th. Sollich  
Verteilung von Schadstoffen durch Regenwürmer (*Lumbricus terrestris*)  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 4028, 1986
- /SCH 94/ C.-D. Schönwiese  
Klimatologie  
UTB 1793, Verlag Eugen Ulmer, 1994
- /SHO 97/ W. Shotyk, A. K. Cheburkin, P. G. Appleby, A. Fankhauser, J. D. Kramers  
Lead in Three Peat Bog Profiles, Jura Mountains, Switzerland: Enrichment  
Factors, Isotopic Composition, and Chronology of Atmospheric Deposition  
Water, Air and Soil Pollution 100 (1997), S. 297-310
- /SIM 95/ J. R. Simmonds, G. Lawson, A. Mayall  
Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Re-  
leases of Radionuclides to the Environment  
European Commission  
Radiation Protection 72, EUR 15760 EN, 1995
- /SOU 81/ Souci/Fachmann/Kraut  
Die Zusammensetzung der Lebensmittel  
Nährwert-Tabellen 1981/82  
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart, 1981
- /SSK 92/ Strahlenschutzkommission  
Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von  
kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem U-  
ranerzbergbau  
Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Band 23  
Gustav Fischer Verlag Stuttgart, Jena, New York 1992

- /STA 83/ Statistisches Bundesamt  
Statistisches Jahrbuch 1983 für die Bundesrepublik Deutschland  
Kohlhammer, 1983
- /STA 96/ Statistisches Bundesamt  
Statistisches Jahrbuch 1996 für die Bundesrepublik Deutschland  
Metzler, Poeschel, 1996
- /STA 97/ Statistisches Bundesamt  
Statistisches Jahrbuch 1997 für die Bundesrepublik Deutschland  
Metzler, Poeschel, 1997
- /STA 98/ Statistisches Bundesamt  
Statistisches Jahrbuch 1998 für die Bundesrepublik Deutschland  
Metzler, Poeschel, 1998
- /STA 99/ Statistisches Bundesamt  
Statistisches Jahrbuch 1999 für die Bundesrepublik Deutschland  
Metzler, Poeschel, 1999
- /TSC 64/ E. Tschirch, E. Jedermann  
Obst- und Gemüsebau  
Humboldt Taschenbücher Bd. 107, 1964
- /TSU 98/ H. Tsukada, H. Shibata, H. Sugiyama  
Transfer of Radiocesium and Stable Cesium from Substrata to Mushrooms  
in a Pine Forest in Rokkasho-mura, Aomori, Japan  
J. Environ. Radioactivity, Vol. 39, S. 149-160, 1998
- /UBA 97/ Umweltbundesamt  
Daten zur Umwelt  
Der Zustand der Umwelt in Deutschland  
Ausgabe 1997  
Erich Schmidt Verlag 1997

- /UKA 98/ Universität Karlsruhe  
Klimadaten  
<http://www.uni-karlsruhe.de/~bh28/kakli.html>, Stand November 1998
- /UOI 99/ Universität Oldenburg  
Caesium-Radioaktivität in Pilzen  
<http://www.physik.uni-oldenburg.de/Docs/puma/radio/pilz8695.html>
- /VIL 95/ M. A. Vile, M. J. v. Novák, E. Brízová, R. Kelman Wieder, W. R. Schell  
Historical Rates of Atmospheric Pb Deposition Using <sup>210</sup>Pb Dated Peat  
Cores: Corroboration, Computation and Interpretation  
Water, Air and Soil Pollution 79 (1997), S. 89-106
- /WAL 70/ H. Walter  
Vegetationszonen und Klima  
UTB 14, Verlag Eugen Ulmer, 1970
- /WIL 95/ A. Wild  
Umweltorientierte Bodenkunde  
Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford 1995
- /WOL 87/ P. Wolff, M. Zoebisch  
Consumption of Irrigation Water in the Federal Republic of Germany  
in: Weatherhead: Advances in Irrigation  
Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Northwest European Irrigation Conference, 1987

### 9.3 Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 2.1:</b> Komponenten der Biosphäre.....	4
<b>Tab. 3.1</b> Klimagürtel und Klimagebiete nach der Köppen-Geiger-Klassifikation .....	9
<b>Tab. 3.2</b> Mögliche Klimasituationen (Köppen-Geiger-Klassifikation) am Standort .....	10
<b>Tab. 4.1</b> Angaben zur Phytomasse und Primärproduktion in der Tundra /WAL 70/... ..	17
<b>Tab. 4.2</b> Nahrungskörbe in der Tundra .....	19
<b>Tab. 4.3</b> Benötigte Treibhausfläche in der Tundra .....	23
<b>Tab. 4.4</b> Wasserbedarf in einer atlantischen Tundra .....	25
<b>Tab. 4.5</b> Angaben zur Phytomasse und Primärproduktion im borealen Nadelwald....	27
<b>Tab. 4.6</b> Nahrungskörbe im feuchtwinterkalten Klima (boreale Nadelwaldzone) .....	30
<b>Tab. 4.7</b> Größe der Rinderherde unter den Bedingungen Klimazone Df .....	33
<b>Tab. 4.8</b> Felder im südlichen Teil der Klimazone Df (boreale Nadelwaldzone) .....	34
<b>Tab. 4.9</b> Verteilung des Beregnungsbedarfs in der Klimazone Df .....	37
<b>Tab. 4.10</b> Wasserbedarf in der Klimazone Df.....	37
<b>Tab. 4.11</b> Nahrungskörbe im wintertrockenen Klima .....	40
<b>Tab. 4.12</b> Benötigte Treibhausfläche im wintertrockenen Klima Dw.....	43
<b>Tab. 4.13</b> Größe der Rinderherde bei wintertrockenem Klima Dw.....	43
<b>Tab. 4.14</b> Weiden in der wintertrockenen Klimazone .....	43
<b>Tab. 4.15</b> Felder im südlichen Teil der wintertrockenen Klimazone.....	43
<b>Tab. 4.16</b> Wasserbedarf in der wintertrockenen Klimazone .....	44
<b>Tab. 4.17</b> Verteilung des Beregnungsbedarfs im feuchtgemäßigten Klima.....	49
<b>Tab. 4.18</b> Nahrungskörbe im feuchtgemäßigten Klima.....	53
<b>Tab. 4.19</b> Benötigte Treibhausfläche im feuchtgemäßigten Klima .....	54
<b>Tab. 4.20</b> Größe der Rinderherde im feuchtgemäßigten Klima .....	54
<b>Tab. 4.21</b> Weiden in der feuchtgemäßigten Klimazone.....	55
<b>Tab. 4.22</b> Felder in der feuchtgemäßigten Klimazone .....	56

<b>Tab. 4.23a</b> Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Edinburgh).....	56
<b>Tab. 4.23b</b> Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Hannover).....	57
<b>Tab. 4.23c</b> Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Prag).....	57
<b>Tab. 4.23d</b> Wasserbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone (Standort Paris).....	57
<b>Tab. 4.24</b> Verteilung des Beregnungsbedarfes im Etesienklima .....	60
<b>Tab. 4.25</b> Nahrungskörbe im Etesienklima .....	62
<b>Tab. 4.26</b> Größe der Rinderherde im Etesienklima .....	64
<b>Tab. 4.27</b> Weiden im Etesienklima .....	65
<b>Tab. 4.28</b> Felder im Etesienklima .....	65
<b>Tab. 4.29a</b> Wasserbedarf im Übergangsbereich zum Etesienklima (Standort Mailand).....	66
<b>Tab. 4.29b</b> Wasserbedarf im Etesienklima (Standort Rom).....	66
<b>Tab. 5.1</b> Förderung von Brunnenwasser in m <sup>3</sup> /a .....	69
<b>Tab. 5.2a:</b> FEP-Liste für Trinkwasserverzehr .....	72
<b>Tab. 5.2b:</b> Vereinfachte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Trinkwasser .....	72
<b>Tab 5.3a:</b> FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Fischen .....	73
<b>Tab. 5.3b:</b> Vereinfachte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Fischen .....	74
<b>Tab. 5.4a:</b> FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Beeren und Pilze .....	76
<b>Tab. 5.4b:</b> Vereinfachte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Beeren und Pilzen .....	77
<b>Tab. 5.5a:</b> FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Milch und Fleisch von Tieren, die im Überschwemmungsgebiet geweidet haben .....	79
<b>Tab. 5.5b:</b> Verkürzte FEP-Liste für die Radionuklidkonzentration in Milch und Fleisch von Tieren, die im Überschwemmungsgebiet geweidet haben ....	80

<b>Tab. 5.6a:</b> FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Beregnungswasser in Feldfrüchte .....	84
<b>Tab. 5.6b:</b> Verkürzte FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Beregnungswasser in Feldfrüchte .....	85
<b>Tab. 5.7a:</b> FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Tränkwasser in Milch und Fleisch .....	92
<b>Tab 5.7b:</b> Vereinfachte FEP-Liste für den Übergang von Radionukliden aus dem Tränkwasser in Milch und Fleisch.....	92
<b>Tab. 6.1</b> Zusammensetzung der Nahrungskörbe (pflanzliche Lebensmittel) .....	97
<b>Tab. 6.2</b> Zusammensetzung der Nahrungskörbe (Wasser, tierische Nahrungsmittel) .....	98
<b>Tab. 6.3</b> Aufenthaltsdauer in den verschiedenen Gebieten .....	99
<b>Tab. 6.4</b> Parameterwerte für den Pfad „Fischverzehr“ .....	101
<b>Tab. 6.5</b> Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch .....	101
<b>Tab. 6.6</b> Elementspezifische Übergangskonstanten $K_e^r$ /BMU 01/ .....	102
<b>Tab. 6.7</b> Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Boden von Überschwemmungsgebieten in Beeren und Pilze .....	103
<b>Tab. 6.8</b> Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Boden in Weidebewuchs.....	104
<b>Tab. 6.9</b> Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes aus dem Futter in Milch und Fleisch von Rindern und Rentieren .....	107
<b>Tab. 6.10</b> Jährlicher Beregnungsbedarf und Beregnungsperiode für Freilandpflanzen.....	109
<b>Tab. 6.11</b> Zeit, in der die Pflanzen beregnet werden, in s .....	110
<b>Tab. 6.12</b> Oberirdische Erträge verschiedener Freilandpflanzen in kg/m <sup>2</sup> .....	111
<b>Tab. 6.13</b> Zeit zwischen Ernte und Verzehr bei verschiedener Freilandpflanzen in s.....	112
<b>Tab. 6.14</b> Zeit zwischen der letzten Beregnung und der Ernte verschiedener Freilandpflanzen in s .....	114



<b>Tab. 6. 15</b>	Ertrag der zum Verzehr bestimmten Freilandpflanzen in kg/m <sup>2</sup> je Ernte	114
<b>Tab. 6.16</b>	Translokationsfaktoren für Getreide, berechnet aus Angaben in /IAEA 94/	116
<b>Tab. 6.17</b>	Klassifizierung der Translokationsfaktoren nach /SIM 95/	116
<b>Tab. 6.18</b>	Translokationsfaktoren $f_{r,Pflanze}^{trans}$ in Bq/kg (FM) : Bq/m <sup>2</sup> (absorbiert)	117
<b>Tab. 6.19</b>	Mindestbedarf der Pflanzen an Bodentiefe in m	120
<b>Tab. 6.20</b>	Angenommene Stärke ( $d_m^{Klima}$ ) und Porosität ( $\varepsilon_{t,m}^{Klima}$ ) der relevanten Bodenschicht; berechnete Flächentrockenmasse $p_m^{Klima}$	126
<b>Tab. 6.21</b>	Jährliche Deposition von Schwebstaub	134
<b>Tab. 6.22</b>	Zuordnung der Elemente zu den Migrationsklassen /BMU 01/ (ergänzt)	137
<b>Tab. 6.23</b>	Abbaukonstanten für die Migration $\lambda_{M,r,m}^{Klima}$	137
<b>Tab. 6.24</b>	Abbaukonstanten für die Deposition von Schwebstaub $\lambda_{Dep,r,m}^{Klima}$	138
<b>Tab. 6.25</b>	Transferfaktoren für den Übergang ausgewählter Radionuklide aus dem Boden in einzelne Pflanzenteile	140
<b>Tab. 6.26</b>	Quellen für die Transferfaktoren für den Übergang von Radionukliden aus dem Boden in einzelne Pflanzenteile (Tabelle 6.25)	141
<b>Tab. 6.27</b>	Parameter zur Berechnung der Radionuklidkonzentration in den oberirdischen Pflanzenteilen von Unter-Glas-Kulturen	143
<b>Tab. 6.28</b>	Jährlicher Beregnungsbedarf und Beregnungsperiode für Freilandpflanzen	145
<b>Tab. 6.29</b>	Täglicher Wasserbedarf von Rentieren und Rindern (l/d)	145
<b>Tab. 6.30</b>	Verschmutzung zubereiteter Nahrung mit Erde (Anteile)	146
<b>Tab. 6.31</b>	Jährlicher Arbeitsaufwand zum Pflügen und Eggen	147
<b>Tab. 6.32</b>	Parameterwerte zur Berechnung der externen Strahlenexposition am Flussufer	148
<b>Tab. 6.33</b>	Parameterwerte zur Berechnung der externen Strahlenexposition im Überschwemmungsgebiet	149

<b>Tab 8.1</b> Empfohlene Verzehraten und Aufenthaltsdauern in belasteten Gebieten.....	195
<b>Tab. 8.2</b> Parameterwerte zur Berechnung des Radionuklidtransports über den Ingestionspfad und den Inhalationspfad.....	196

#### 9.4 **Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 4.1** Klimadiagramm für eine Tundra: Isfjord, Spitzbergen (23 Jahre) 16
- Abb. 4.2** Klimadiagramm für eine hochatlantische Tundra: Stykkisholmur, Island  
16
- Abb. 4.3** Ingestionspfade im Tundrenklima  
21
- Abb. 4.4** Klimadiagramm für feuchtwinterkaltes Klima: Oslo  
26
- Abb. 4.5** Ingestionspfade im feuchtwinterkalten Klima ohne Pfad Boden – Rind –  
Milch/Fleisch – Mensch) 32
- Abb. 4.6** Beregnungsbedarf im Süden der borealen Nadelwaldzone (Oslo)  
36
- Abb. 4.7** Bereinigter Beregnungsbedarf im Süden der borealen Nadelwaldzone  
36
- Abb. 4.8** Klimadiagramm für wintertrockenes Klima: Verkhoyansk  
38
- Abb. 4.9** Beregnungsbedarf im wintertrockenen Klima (Verkhoyansk)  
39
- Abb. 4.10** Ingestionspfade im wintertrockenen Klima (ohne Pfad Boden – Rind –  
Milch/Fleisch – Mensch) 42
- Abb. 4.11** Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Hannover  
46
- Abb. 4.12** Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Edinburgh  
46

- Abb. 4.13** Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Paris  
47
- Abb. 4.14** Klimadiagramm für feuchtgemäßigtes Klima: Prag  
47
- Abb. 4.15** Beregnungsbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone: Edinburgh, Prag  
48
- Abb. 4.16** Beregnungsbedarf in der feuchtgemäßigten Klimazone: Hannover, Paris  
49
- Abb. 4.17** Klimadiagramm für den Übergang zum Etesienklima: Mailand  
58
- Abb. 4.18** Klimadiagramm für Etesienklima: Rom  
59
- Abb. 4.19** Beregnungsbedarf im Etesienklima  
60
- Abb. 4.20** Ingestionspfade im Etesienklima  
63
- Abb. 5.1** Einige Transportwege für Radionuklide bei Beregnung  
83
- Abb. 6.1** Konzentration von Pu 239,240 und Np 237 in einem unbearbeiteten Wiesenboden, berechnet nach Angaben in /BUN 95b/  
129
- Abb. 7.1a** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Einzelnuclide, Teil 1  
152

- Abb. 7.1b** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Einzelnuklide, Teil 2  
152
- Abb. 7.1c** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Einzelnuklide, Teil 3  
153
- Abb. 7.2** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Thorium-Reihe  
153
- Abb. 7.3** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Neptunium-Reihe  
154
- Abb. 7.4** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Uran-Radium-Reihe  
154
- Abb. 7.5** Strahlenexposition durch Freisetzung von Brunnenwasser mit der Radionuklidkonzentration 1 Bq/l: Actinium-Reihe  
155
- Abb. 7.6** Strahlenexposition durch Se 79 in Brunnenwasser (1 Bq/l)  
157
- Abb. 7.7** Strahlenexposition durch Nb 94 in Brunnenwasser (1 Bq/l)  
157
- Abb. 7.8** Strahlenexposition durch Tc 99 in Brunnenwasser (1 Bq/l)  
158
- Abb. 7.9** Strahlenexposition durch I 129 in Brunnenwasser (1 Bq/l)  
158

<b>Abb. 7.10</b>	Strahlenexposition durch Cs135 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
		159
<b>Abb. 7.11</b>	Strahlenexposition durch Cs137 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
		159
<b>Abb. 7.12</b>	Strahlenexposition durch Pu 239 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
		160
<b>Abb. 7.13</b>	Strahlenexposition durch Am 241 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
		160
<b>Abb. 7.14</b>	Strahlenexposition durch Cm 247 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
		161
<b>Abb. 7.15</b>	Strahlenexposition durch I 129 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
	Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie	
		162
<b>Abb. 7.16</b>	Strahlenexposition durch Pu 239 in Brunnenwasser (1 Bq/l)	
	Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie	
		163
<b>Abb. 7.17a</b>	Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:	
	Einzelnuclide, Teil 1	164
<b>Abb. 7.17b</b>	Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:	
	Einzelnuclide, Teil 2	165
<b>Abb. 7.17c</b>	Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:	
	Einzelnuclide, Teil 3	165
<b>Abb. 7.18</b>	Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:	
	Thorium-Reihe	166

- Abb. 7.19** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Neptunium-Reihe 166
- Abb. 7.20** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Uran-Radium-Reihe 167
- Abb. 7.21** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser:  
Aktinium-Reihe  
167
- Abb. 7.22** Strahlenexposition durch Freisetzung von Se 79 (1 Bq/a)  
168
- Abb. 7.23** Strahlenexposition durch Freisetzung von Nb 94 (1 Bq/a)  
169
- Abb. 7.24** Strahlenexposition durch Freisetzung von Tc 99 (1 Bq/a)  
169
- Abb. 7.25** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/a)  
170
- Abb. 7.26** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 135 (1 Bq/a)  
170
- Abb. 7.27** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 137 (1 Bq/a)  
171
- Abb. 7.28** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/a)  
171
- Abb. 7.29** Strahlenexposition durch Freisetzung von Am 241 (1 Bq/a)  
172
- Abb. 7.30** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cm 247 (1 Bq/a)  
172

- Abb. 7.31** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/l) Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie 174
- Abb. 7.32** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/l) Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie 174
- Abb. 7.33a** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Einzelnuklide Teil 1 c 177
- Abb. 7.33b** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Einzelnuklide Teil 2 177
- Abb. 7.33c** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Einzelnuklide Teil 3 178
- Abb. 7.34** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Thorium-Reihe 178
- Abb. 7.35** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Neptunium-Reihe 179
- Abb. 7.36** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Uran-Radium-Reihe 179
- Abb. 7.37** Strahlenexposition durch Freisetzung von 1 Bq/a in Brunnenwasser, keine Beregnung von Weiden: Aktinium-Reihe 180



**Abb. 7.38** Strahlenexposition durch Freisetzung von Se 79 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

181

**Abb. 7.39** Strahlenexposition durch Freisetzung von Nb 94 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

181

**Abb. 7.40** Strahlenexposition durch Freisetzung von Tc 99 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

182

**Abb. 7.41** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

182

**Abb. 7.42** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 135 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

183

**Abb. 7.43** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cs 137 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

183

**Abb. 7.44** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

184

**Abb. 7.45** Strahlenexposition durch Freisetzung von Am 241 (1Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

184

**Abb. 7.46** Strahlenexposition durch Freisetzung von Cm 247 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht berechnet werden

185

**Abb. 7.47** Strahlenexposition durch Freisetzung von I 129 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht beregnet werden. Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie.  
186

**Abb. 7.48** Strahlenexposition durch Freisetzung von Pu 239 (1 Bq/a), wenn Weiden nicht beregnet werden. Berücksichtigung der Pflanzenmorphologie .  
186