

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Fachliche Unterstützung des BfS bei der Erstellung von
Referenzbiosphärenmodellen für den radiologischen
Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern - Modellierung des
Radionuklidtransports in Biosphärenobjekten
- Vorhaben 3609S50005**

Auftragnehmer:

Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH)

C. Staudt

N. Semiochkina

J. C. Kaiser

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



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

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

BfS-RESFOR-78/13

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de: 0221-2013041210526

Salzgitter, April 2013

Abschlussbericht für das Vorhaben BfS 3609S50005

**Fachliche Unterstützung des BfS bei der
Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen
für den radiologischen
Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern
- Modellierung des Radionuklidtransports in
Biosphärenobjekten**

Christian Staudt, Natalja Semiochkina und Jan Christian Kaiser

Institut für Strahlenschutz, Helmholtz Zentrum München.

Februar 2012 (Revision 1)

Impressum

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

Dr. Christian Staudt

Dr. Natalja Semiochkina

Dr. Christian Kaiser

Inhalt

1: Einleitung.....	7
2: Definition der Randbedingungen der Exposition	10
2.1: Vorgehensweise nach BIOMASS	10
2.2: Erstellung der FEP-Liste nach der BIOMASS Methodologie	10
2.3: Begutachtungszusammenhang	10
2.4: Biosphären - Merkmale.....	11
2.5: Biosphären - Ereignisse und Prozesse	12
2.6: FEP's zur Exposition des Menschen.....	12
2.7: BIOMOVs, BIOGEM, BIOCLIM und BIOMOSA	13
2.8: Endlagerplanung in Schweden, Finnland, USA, Kanada, Großbritannien und Frankreich.....	15
2.8.1 Yucca Mountain, USA	15
2.8.2 Forsmark, Schweden	16
2.8.3 Olkiluoto, Finnland.....	17
2.8.4 Bruce, Kanada	18
2.8.5 Großbritannien	18
2.8.6 Frankreich	18
2.9 Biosphärenmodellierung in Schweden, Kanada und Deutschland.....	19
2.9.1 Biosphärenmodellierung in Schweden	19
2.9.2 Biosphärenmodellierung in Kanada.....	20
2.9.3 Biosphärenmodellierung in Deutschland	21
2.9.4 Zusammenfassung vorhergehender Arbeiten und neue Ansätze	22
3: Systemanalyse für Nord- und Süddeutschland	23
3.1: Charakterisierung der gegenwärtigen Situation (Ist-Zustand).....	23
3.1.1: Kurzcharakterisierung	23
3.1.2: Topographie im nord- und süddeutschen Raum	23
3.1.3: Moore und Austrocknung von Seen	27
3.1.4: Klimatische Bedingungen.....	30
3.1.5: Bewässerung in der Landwirtschaft.....	31

3.1.6: Beschreibung der vorwiegenden Landnutzung in der Landwirtschaft	33
3.2: Charakterisierung möglicher zukünftiger Zustände.....	35
3.2.1: Analyse von BIOCLIM.....	35
3.2.2: Zuordnung von Klimastationen.....	37
3.2.3: Ableitung möglicher zukünftiger Klimazustände für Nord- und Süddeutschland	43
3.2.4: Einfluss des Klimawandels auf die Landnutzung	46
4: Analyse der relevanten Prozesse.....	50
4.1: Komplette Interaktionsmatrix nach BIOMOVSI und BIOMASS.....	50
4.1.1 Grundwasser	50
4.1.2 Oberflächenwasser	52
4.1.3 Sediment.....	53
4.1.4 Landwirtschaftliche Böden	54
4.1.5 Atmosphäre	54
4.1.6 Pflanzen	55
4.1.7 Tiere	55
4.1.8 Mensch.....	55
4.2: Interaktionsmatrix des Modells	56
4.3: Transferfaktoren Boden Pflanze	57
4.3.1 Definition und Unsicherheiten	57
4.3.2 Faktoren, die den Transferfaktor von Radionukliden in Pflanzen beeinflussen können	58
5: Projektion der Prozesse und Mechanismen in die Zukunft unter besonderer Berücksichtigung von Klimaveränderungen	61
5.1: Einfluss von Klimaveränderungen auf das Grundwasser und Eintrittsort des Grundwassers in die Biosphäre	61
5.2: Beregnungsbedürftigkeit von Nutzpflanzen	62
5.3: Ernährungsgewohnheiten	64
5.4: Spektrum an Nutzpflanzen und Haustieren	69
6: Entwicklung von radioökologischen Biosphärenmodellen.....	70
7: Berechnung von normierten Strahlenexpositionen für Referenzpersonen ...	81
7.1: BDCF ^S für Marrakesch – wärmeres trockenes Klima	81

7.2: BDCF ^S für Rom - wärmeres feuchteres Klima	82
7.3: BDCF ^S für Valladolid - wärmeres Klima	83
7.4: BDCF ^S für Santander – feuchteres Klima	84
7.5: BDCF ^S für Rostow – trockeneres Klima.....	85
7.6: BDCF ^S für Turku – Kälteres feuchtes Klima.....	86
7.7: BDCF ^S für Sodankylä – kälteres Klima	87
7.8: BDCF ^S für Vardo – Rentierszenario – kälteres trockenes Klima, Permafrost	88
7.9: BDCF ^S für Elbe – Ernährung Durchschnittswert	89
7.10: BDCF ^S für Elbe - Ernährung 95 Perzentil	90
7.11: BDCF ^S für Elbe – Sonderszenarien erwachsene Vegetarier und historische Ernährung Deutschland um 1900	91
7.12: BDCF ^S für Weser/Aller - Ernährung Durchschnittswert.....	92
7.13: BDCF ^S für Weser/Aller - Ernährung 95 Perzentil	93
7.14: BDCF ^S für Donau - Ernährung Durchschnittswert	94
7.15: BDCF ^S für Donau - Ernährung 95 Perzentil	95
7.16: BDCF ^W für subtropische Referenzklimaregionen Marrakesch, Rom und Valladolid	96
7.17: BDCF ^W für Referenzklimaregion Elbe.....	97
7.18: BDCF ^W für Referenzklimaregion Weser/Aller	98
7.19: BDCF ^W für Referenzklimaregion Donau	99
7.20: BDCF ^W für die gemäßigten Referenzklimaregionen Santander und Rostow.....	100
7.21: BDCF ^W für die borealen Referenzklimaregionen Turku, Sodankylä und Vardo.....	101
8: Diskussion	102
8.1: Beitrag der Expositionspfade zur Gesamtexposition	102
8.2: Bodenklassen	103
8.3: Unterschiedliche Ernährungsgewohnheiten.....	104
8.4: Unterschiedliche Altersgruppen	105
8.5: Referenzregionen in Nord und Süddeutschland	106
8.6: Referenzregionen zum Klimawandel	108
8.7: Zusammenfassung	110

9: Anhang	113
9.1: FEP Liste	113
9.2: Parameter	121
10: Danksagung	130
11: Literatur	131

1: Einleitung

Zur Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in stabilen geologischen Formationen müssen Langzeitsicherheitsnachweise geführt werden, um die sichere Endlagerung zu gewährleisten. Für den Fall des Austritts von Radionukliden aus dem Endlager ist die potenzielle Exposition der Bevölkerung durch ionisierende Strahlung abzuschätzen. Ein wichtiger Ansatz zur Abschätzung der potenziellen Strahlenexposition besteht in der Modellierung des Transportes von Radionukliden durch die Geosphäre und Biosphäre bis hin zum Menschen. Wegen der Komplexität der zu betrachtenden Prozesse ist die Erstellung eines einzigen Großmodells nicht möglich. Die Modellierung wird mit Teilmodellen durchgeführt, die den Transport durch die geologischen Formationen, in den oberen Bodenschichten, durch die Nahrungskette und andere relevante Pfade getrennt betrachten.

Die Exposition wird für eine autarke Bevölkerungsgruppe abgeschätzt, die ihre gesamte Nahrung und Trinkwasser aus einem Einzugsbereich um das Endlager bezieht. Eine wichtige Voraussetzung ist, dass die autarke Gruppe sich so verhält, als ob eine radioaktive Kontamination der Umwelt nicht besteht. Deshalb werden mögliche Vorsichtsmaßnahmen nicht betrachtet. Diese Annahme ist stark konservativ, da eine rein selbstversorgende Gemeinschaft auf dem heutigen sozialen und technischen Entwicklungsstand sehr unwahrscheinlich ist und keinen hundertprozentigen Selbstversorgungsgrad erreichen wird (Biesold et al., 2004).

Für die Einrichtung eines Endlagers wurden im Rahmen der Studie von Förster et al. 2010 drei Referenzregionen mit geologischen Salz- und Tonformationen (BGR, 2007) in Nord- und Süddeutschland untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie bilden die Grundlage für die Ableitung von Biosphärenmodellen, die auch mögliche geogene oder anthropogene Veränderungen des Klimas berücksichtigen sollen. Dies ist notwendig, da der Nachweis über einen sehr langen Zeitraum von bis zu 10^6 Jahren erbracht werden muss (BfS, 2005). Während derartig langer Einlagerungszeiten sind mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit Klimaänderungen zu erwarten (BIOCLIM, 2004; Pinedo et al., 2005).

Die Betrachtung von paläoklimatischen Daten ermöglicht eine Abschätzung der Klimaentwicklung in der Zukunft. Während der letzten 10^6 Jahre gab es in Mitteleuropa mehrere Kaltzeiten mit glazialen Überdeckungen. Aus diesem Grund muss eine Änderung des Klimas zu kälteren Bedingungen für die Zukunft im Modell berücksichtigt werden. Andererseits ist auch eine Erwärmung des Klimas relativ zu den heutigen Bedingungen möglich. Zusätzlich kann das Klima entweder trockener oder feuchter werden. All diese Änderungen beeinflussen sowohl das Verhalten der Radionuklide in den oberflächennahen Bodenschichten, als auch deren Transport durch die Nahrungskette.

Die Jahresmitteltemperatur schwankte während diesem Zeitraum etwa um 10-15°C (BIOCLIM, 2004; Petit et al., 1999). Um diese Änderungen abzubilden,

wurden neun klimatische Referenzstationen innerhalb Europas und Nordafrikas definiert, die eine ähnliche Temperatur-Bandbreite aufzeigen. Acht dieser Referenzstationen bilden zusammen mit den drei Referenzregionen in Deutschland als zentralem Punkt eine Matrix, in der sich das Klima, was Temperatur und Feuchtigkeit angeht, vom heutigen Standpunkt aus gesehen in verschiedene denkbare Richtungen bewegen kann. Diese real existierenden Referenzregionen definieren die Rahmenbedingungen, unter denen zukünftige Generationen nach heutigem Kenntnisstand existieren können.

Die Modellierung der Referenzbiosphärenmodelle (RBM) erfolgt mit festgelegten Radionuklidkonzentrationen von 1 Bq/kg im Boden. Alternativ gelangen Radionuklide über aus Brunnen abstrahiertem Grundwasser, mit einer Radionuklidkonzentration von 1 Bq/l in die Biosphäre. Das Brunnenwasser wird auch als Trinkwasser verwendet. Kontaminationen können zudem in stehenden Vorflutern auftreten, die auch zur Fischzucht verwendet werden. Eine weitere Akkumulation von Radionukliden durch die Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen wird nicht modelliert.

Für die Modellierung wird ein modularer Ansatz verfolgt, der durch Betrachtung typischer Klima- und Bodenverhältnisse charakterisiert ist. Die Charakterisierung erfolgt durch die Übertragung von realistischen Referenzzuständen für Klima und Boden in die beschriebenen Referenzregionen innerhalb Deutschlands (Förster et al., 2010). Biosphärenmodelle für verschiedene Expositionsszenarien werden durch sinnvolle Kombinationen von Referenzklimata und Referenzböden gebildet. Der Modellierungsansatz ist so gewählt, dass das Modell auch auf andere Referenzklimaregionen übertragen werden kann.

Für jedes Biosphärenmodell wird ein Satz von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren ermittelt. Bei einer vorgegebenen nuklidspezifischen Aktivitätskonzentration im Boden oder Grundwasser kann damit die Individualdosis abgeschätzt werden, die in verschiedenen Altersgruppen einer autarken Bevölkerungsgruppe im Mittel auftreten wird. Diese Dosiskonversionsfaktoren für Biosphären (engl.: Biosphere Dose Conversion Factor BDCF [BDCF^W in Sv/a normiert auf 1 Bq/l Grundwasser und BDCF^S in Sv/a normiert auf 1 Bq/kg im Boden]) bilden den Endpunkt der Modellierung.

Startpunkt der Rechnungen sind Einheitskonzentrationen von Radionukliden im Grundwasser und im landwirtschaftlich genutzten Boden. Werte für diese Konzentrationen ergeben sich durch hydrogeologische Transportvorgänge, die die Nuklide aus dem Endlager in die Biosphäre befördern und durch physikalische sowie bio-geochemische Prozesse in den oberen Bodenschichten, die im Arbeitspaket „Boden“ modelliert werden.

Durch Analyse der BDCF wird untersucht, ob eine Einteilung der großen Anzahl von Biosphärenmodellen in Gruppen mit ähnlichen Expositionen, die durch ähnliche BDCF gegeben sind, möglich ist. Die im modularen Ansatz identifizierten typischen Biosphärenmodelle können als Grundlage für die Ausarbeitung von strahlenschutzrechtlichen Regelungen dienen, wobei der

verwendete Referenzbiosphärenansatz eine Abschätzung zukünftiger Radionuklidexpositionen an nord- und süddeutschen Standorten zulässt.

2: Definition der Randbedingungen der Exposition

2.1: Vorgehensweise nach BIOMASS

In dem BIOMASS (BIosphere Modelling and ASSESSment) Projekt wurden grundlegende Richtlinien zur Erstellung von RBM erarbeitet und vorgestellt (IAEA, 2003). Die Kernpunkte der BIOMASS Methodologie sind:

- Das Erstellen eines Begutachtungs-Zusammenhangs
- Die Identifikation und Rechtfertigung von Biosphären Systemen
- Die Beschreibung der Biosphären Systeme
- Die Begutachtung möglicher exponierter Gruppen
- Modellentwicklung
- Berechnung
- Iteration

Dazu werden zusätzlich sogenannte Eigenschaften, Ereignisse und Prozess Listen (Features, Events and Prozesses FEP) verwendet. Diese beschreiben, zusammen mit Transfermatrizen, den Transport der Radionuklide in der betrachteten Biosphäre. Die Aufstellung eines klaren und vollständigen konzeptuellen Modells mit Hilfe der BIOMASS Methodologie ermöglicht somit die Erstellung eines mathematischen Modells. Besondere Sorgfalt ist hierbei auch der kritischen Auswahl der einzelnen Parameter zu widmen, da diese das Ergebnis des Modells entscheidend beeinflussen.

2.2: Erstellung der FEP-Liste nach der BIOMASS Methodologie

Die Biosphärenmodelle werden aus der FEP-Liste nach BIOMASS (IAEA, 2003) abgeleitet, die im Anhang wieder gegeben ist. Die Haupt-FEP-Liste (**Tabelle 11a**) im Anhang gilt für ein Szenario in gemäßigten Klimazonen. Bei Änderungen des Klimas zu kälteren Tundra Bedingungen müssen einzelne FEP abgeändert werden (**Tabellen 11b**). Das Tundra Szenario simuliert eine selbstversorgende Jäger-Sammler Gemeinschaft.

2.3: Begutachtungszusammenhang

Der Zweck der Begutachtung ist die Ermittlung von geeigneten Regionen innerhalb von Deutschland zur Einrichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle. Zu diesem Zweck werden BDCF für eine Reihe von Radionukliden ermittelt, die für die Endlagerung relevant sind. Mit Hilfe dieser BDCF^W und BDCF^S können dann für eine vorgegebene Belastung des Grundwassers und Bodens mit Radionukliden jährliche Individualdosen für eine Bevölkerungsgruppe im betroffenen Gebiet berechnet werden. Mögliche

Einflüsse eines Klimawandels während des Einlagerungszeitraus werden durch die Verwendung von Referenzklimastationen abgedeckt.

Es werden vor allem die Stoffflüsse innerhalb der Biosphäre betrachtet, um die Weitergabe von Radionukliden über die Nahrungskette zum Menschen zu analysieren. Die Modellbildung muss die relevanten Faktoren möglichst genau erfassen. Sie soll dabei allerdings so übersichtlich bleiben, dass eine Begutachtung und Modifikation durch Dritte jederzeit möglich bleibt.

Für die Modellierung der Referenzregionen werden Gebiete innerhalb Deutschlands berücksichtigt, in denen Salzstöcke oder Tonformationen vorhanden sind, die für die Endlagerung potenziell geeignet sind. Die Modellbildung konzentriert sich dann auf die Betrachtung der Stoffflüsse in der Biosphäre, vor allem im landwirtschaftlich genutzten Land und in Vorflutern, die durch den hydraulischen Anschluss an den Grundwasserkörper kontaminiert werden könnten. Dabei werden zur Berechnung einheitliche Aktivitäten von 1 Bq/l im Grundwasser für die BDCF^W und 1 Bq/kg im Boden für die BDCF^S angenommen. Die Schnittstellen zwischen der Geosphäre und der Biosphäre sind dabei die landwirtschaftlich genutzten Äcker und Weideböden sowie über Brunnen entnommenes Grundwasser.

Es wird angenommen, dass Oberflächenwasser, zum Beispiel für die Fischzucht oder zum Tränken von Tieren, ebenfalls eine Aktivität von 1 Bq/l enthält, und es nicht zu einer Verdünnung und einem Abtransport der Radionuklide durch Regen oder unkontaminiertes Oberflächenwasser kommt.

Der Zeitraum der Begutachtung beträgt bis zu 10⁶ Jahre. Aufgrund dieses langen Begutachtungszeitraums ist es notwendig, mögliche Änderungen des Klimas in den Referenzregionen mit zu berücksichtigen, welche einen Einfluss auf die Biosphäre haben werden. Die einzelnen Referenzbiosphärenmodelle sind statisch, da es aufgrund der Verwendung normierter Aktivitäten im Boden nicht zu Akkumulationsvorgängen von Radionukliden im Boden kommt.

2.4: Biosphären - Merkmale

Innerhalb Deutschlands wurden in einem anderen Projekt drei Referenzregionen definiert, in denen die Lagerung von hochradioaktiven Abfällen in geeigneten geologischen Formationen begutachtet werden sollte (Förster et al., 2010). Für die Bildung der Biosphärenmodelle in diesen Referenzregionen werden zuerst die derzeitigen klimatischen Bedingungen bestimmt, die durch Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag charakterisiert sind. Anschließend werden mögliche Änderungen des Klimas mit acht sogenannten Referenzklimaregionen abgebildet. Dazu wurden real existierende Klimastationen ausgewählt, die eine Änderung des Klimas in alle realistisch möglichen Richtungen widerspiegeln. Anschließend wurden diese in drei Hauptkategorien boreales, gemäßigt und subtropisches Klima, aufgeteilt. Ausgehend vom derzeitigen in den deutschen Referenzregionen

vorherrschenden gemäßigten Klima können sich möglicherweise Änderungen zu höheren oder niedrigeren Durchschnittstemperaturen oder Niederschlägen ergeben. Die Abfolge möglicher zukünftiger Klimazustände wird mit Hilfe von Ergebnissen aus dem BIOCLIM Projekte abgeschätzt (BIOCLIM, 2004).

Die heutigen Ernährungsgewohnheiten und landwirtschaftlichen Praktiken werden für die verschiedenen Referenzklimata ermittelt. Es wird angenommen, dass sich die landwirtschaftlichen Praktiken und Ernährungsgewohnheiten von autarken Gemeinschaften der Klimaänderung anpassen. Die Änderungen des Klimas bedingen außerdem Änderungen in den betrachteten Grenzsyste men wie landwirtschaftlichen Nutzflächen, Weiden und Gewässern.

2.5: Biosphären - Ereignisse und Prozesse

Die Änderungen in der Biosphäre sind hauptsächlich auf den Klimawandel im Begutachtungszeitraum zurück zu führen. Änderungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit führen zu einem Wandel des Verhaltens der Radionuklide im Boden durch veränderten Boden pH-Wert und Redoxpotential. Da der Transport der Nuklide dann über die Pflanzen zu den Tieren und zum Menschen stattfindet, ist der Aufbau der Nahrungskette in der modellierten Region von entscheidender Bedeutung. Dazu zählen vor allem die landwirtschaftlichen Praktiken und Ernährungsgewohnheiten der betrachteten autarken Gemeinschaft.

Neben dem Weg über Grundwasser und Boden zur Nahrung bzw. zum Trinkwasser des Menschen können Radionuklide auch über Inhalation von Staub oder Gasen in den menschlichen Körper gelangen. Außerdem kann es zu einer externen Exposition über den Kontakt mit kontaminierten Substanzen, wie z.B. Erde, kommen. Diese Arten der Radionuklidaufnahme sollen ebenfalls im Modell betrachtet werden.

Für die Landnutzung werden Sand, Lehm, Ton und organische Bodentypen betrachtet. Da der autarken Gemeinschaft eine mögliche Kontamination nicht bekannt ist, werden von dieser auch keine Gegenmaßnahmen, wie Wasseraufbereitung zur Verminderung der Radionuklidexposition, unternommen.

2.6: FEP's zur Exposition des Menschen

Menschliche Gewohnheiten werden vor allem im Zusammenhang mit Landwirtschaft und Nahrungsaufnahme betrachtet. Genutzte Ressourcen aus dem potenziell kontaminierten Bereich sind hierbei Trinkwasser sowie pflanzliche und tierische Nahrungs- und Futtermittel. Dabei werden sowohl landwirtschaftlich gewonnene Nahrungsmittel, als auch aus der Natur

gesammelte Nahrungsmittel wie Fisch und in der Tundra Klimaregion Pilze, Beeren und Rentierfleisch betrachtet. Ein Vergleich mit historischen Daten oder vegetarischer Ernährungsweise kann dabei einen Eindruck für die Änderung der BDCF durch unterschiedliche Verzehrsgewohnheiten geben.

Bei einer Standortsuche für ein Endlager für wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall müssen die Auswirkungen auf potentiell exponierte Gruppen abgeschätzt werden um zu gewährleisten, dass eine Exposition über den Einlagerungszeitraum die derzeit gültigen Grenzwerte nicht überschreitet. Dies soll in dem folgenden Projekt für verschiedene deutsche Referenzregionen und mögliche Änderungen des Klimas während des Einlagerungszeitraumes geschehen. Die BDCF werden für unterschiedliche Altersgruppen berechnet.

2.7: BIOMOVs, BIOGEM, BIOCLIM und BIOMOSA

Frühere Versuche zur Entwicklung und zum Vergleich unterschiedlicher Modelle zur Abschätzung von Strahlendosen bei langanhaltenden Expositionen vor dem BIOMASS Projekt waren BIOMOVs und BIOMOVs II (BIOMOVs, 1991). Im BIOMOVs II Projekt wurden eine Methodologie zur Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen entwickelt, FEP Listen zur Strukturierung der Modelle erarbeitet und Beispiele zur Illustration der Methodologie erstellt (van Dorp, et al. 1999).

Parallel zu BIOMASS wurde das BIOMOSA (BIOSphere Models for SAFety assessment of radioactive waste disposals based on the application of the reference biosphere methodology) Projekt durchgeführt (Olyslaegers et al., 2005). Die heutigen klimatischen und soziologischen Bedingungen an fünf europäischen Standorten in Spanien, Belgien, Deutschland, Ungarn und Schweden wurden zur Entwicklung von standortspezifischen Modellen nach der BIOMASS Methodologie herangezogen. Als Endpunkt wurde die potentielle jährliche Belastung von Individuen durch kontaminiertes Grundwasser unter Berücksichtigung verschiedener landwirtschaftlicher und biosphärenspezifischer Expositionspfade in einem „Brunnen“-Szenario, in dem kontaminiertes Grundwasser über einen Brunnen in die Biosphäre gelangt, modelliert. Da die mathematische Gestaltung für die unterschiedlichen Modelle nicht komplett einheitlich war, wurden hierbei teilweise unterschiedliche Expositionspfade mehr oder weniger stark berücksichtigt, wodurch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert wird. Dieser Nachteil soll in diesem Projekt mit dem Referenzbiosphärenansatz behoben werden.

Es zeigte sich, dass das Klima in den unterschiedlichen Referenzbiosphären eine Rolle spielt, da es wichtige Einflussgrößen wie die Menge der zur Landwirtschaft benötigten Bewässerung oder die Staubentwicklung durch Trockenheit bestimmt. Andere Parameter, wie etwa die Verzehrsgewohnheiten der Bevölkerung und radionuklid-spezifische Bodenparameter, beeinflussen die Ergebnisse ebenfalls und können auch durch Klimaänderungen beeinflusst werden. So ändern sich zum Beispiel der pH Wert des Bodens oder das

Redoxpotential bei Änderung von Niederschlagsmengen und Temperatur aufgrund eines veränderten Wassergehalts des Bodens. Die Ernährungsgewohnheiten passen sich den klimabedingten Änderungen der Landwirtschaft an (Olyslaegers et al., 2005).

Um die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse zu verbessern, wurde ein generisches Biosphären Modellierungsprogramm BIOGEM (BIOsphere GEneric Model) erstellt und mit den Ergebnissen des BIOMOSA Projekts verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse des generischen BIOGEM Modells durchaus mit denen der standortspezifischen BIOMOSA Modellen vergleichbar sind (Chen et al., 2004). Zwar unterscheiden sich die Beiträge der einzelnen Expositionspfade zwischen den Herangehensweisen, die Endergebnisse variieren dann allerdings lediglich um einen Faktor zwei. Es zeigte sich weiterhin, dass die größten Unterschiede dann auftraten, wenn es Unsicherheiten bei den Eingangsparametern, etwa für das Radionuklid Se-79, gibt. Dass die Ergebnisse trotzdem gut miteinander vereinbar sind, ist wohl durch die einheitliche Benutzung der BIOMASS Methodologie begründet (Chen et al., 2006).

In den langen Zeiträumen, die für das Lagern von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen betrachtet werden müssen, ist eine Änderung des Klimas in der Region eines geplanten Endlagers während des Einlagerungszeitraums anzunehmen. Im BIOCLIM (Modeling sequential BIOsphere systems under CLIMate change for radioactive waste disposal) Projekt wurden Art und mögliche Auswirkungen eines Klimawandels während des Einlagerungszeitraums abgeschätzt (BIOCLIM, 2004). Um einen Eindruck von möglichen Klimaentwicklungen während der nächsten 10^6 Jahre zu erhalten, ist eine Betrachtung der paleoklimatischen Daten in Europa während der letzten Eiszeiten und Zwischeneiszeiten angemessen. Zusätzlich wurden zur Modellierung zukünftiger Klimazustände Milankovic Zyklen und verschiedene Szenarien mit „natürlichen“ und „erhöhten“ CO_2 Konzentrationen der Erdatmosphäre verwendet. Änderungen des Klimas wurden für verschiedene Szenarien modelliert und als Grundlage für weitere Projekte, zum Beispiel zur Erstellung von Referenzbiosphären nach BIOMASS Methodologie, zur Verfügung gestellt. Mögliche Auswirkungen auf Klima, Topographie, Böden, Gewässer, Biota und menschliche Gemeinschaften wurden für unterschiedliche europäische Standorte abgeschätzt.

Die Modellergebnisse von BIOCLIM zur kurzfristigen Klimaentwicklung in Mitteleuropa zu wärmeren Bedingungen bei erhöhtem CO_2 Gehalt der Atmosphäre in den nächsten Jahrhunderten sind qualitativ mit den Modellergebnissen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) vergleichbar (IPCC, 2007).

Durch Klimawandel bedingte Änderungen in den Referenz-Biosphären sind aus diesen Gründen jetzt über längere Zeiträume systematisch zu modellieren. Zu diesem Zweck gibt es inzwischen sowohl theoretische Überlegungen zu allgemeinen Faktoren (Pinedo et al., 2005), als auch Untersuchungen und Modellierungen für Standorte, an denen Endlager eingerichtet werden sollen,

wie etwa Yucca Mountain in den USA und Forsmark in Schweden (EPRI, 2009; Kelkar et al., 2010).

2.8: Endlagerplanung in Schweden, Finnland, USA, Kanada, Großbritannien und Frankreich

Die Einrichtung von Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle ist eine wissenschaftliche und technische Herausforderung, an der eine Reihe von nationalen und internationalen Organisationen arbeiten. Dabei werden sowohl generische (IAEA, 2003; Olyslaegers et al., 2005), als auch standortspezifische Ansätze verfolgt (EPRI, 2009; Hjerpe et al., 2009; SKB, 2011).

Als Beispiel seien hier Schweden, Finnland, die Vereinigten Staaten, Kanada Großbritannien und Frankreich genannt. In Schweden (Forsmark) und Finnland (Olkiluoto) sind bereits Standorte für Endlager ausgewählt worden. Die Bewertungen zur Tauglichkeit dieser Standorte sind im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. In den USA war der Yucca Mountain als Endlager vorgesehen und eine große Anzahl geologischer und biosphärenspezifischer Studien sind durchgeführt worden. Allerdings wurde zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes die Finanzierung der Entwicklung von Yucca Mountain zu einem Endlager gestoppt.

2.8.1 Yucca Mountain, USA

Die Region um den Yucca Mountain in Nevada, USA war bis vor kurzem als Standort für ein Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle vorgesehen. 2009 wurde das Projekt von der Regierung der Vereinigten Staaten einstweilen gestoppt.

Das Gebiet befindet sich in der Nähe der Amargosa Wüste und der Nevada National Security Site, wo von 1951 bis 1962 oberirdischen und unterirdischen Atomtests durchgeführt wurden. Seit zwei Jahrzehnten wurden ausgiebige Studien und Modellierungen zur Tauglichkeitsüberprüfung des Yucca Mountains als Endlager durchgeführt. Dabei wurden sowohl der Radionuklidtransport durch die Geosphäre (Kelkar et al., 2010; Patera et al., 1990) als auch durch die Biosphäre untersucht (Smith und Kozak, 2011; Smith et al., 1996; Watkins et al., 1999).

Die so gewonnenen Erkenntnisse über die Modellierung des kompletten Yucca Mountain Geosphären-Biosphären Systems wurde vom Electric Power Research Institute (EPRI) in IMARC (Integrated Multiple Assumptions and Release Code) zusammengefasst (EPRI, 2009). Da der Standort Yucca Mountain vorgegeben war, konnte eine genaue Analyse der Eigenschaften von Geosphäre und Biosphäre durchgeführt werden. Neben dem ariden Klima ist die Tatsache, dass das Endlager im Yucca Mountain über dem Grundwasserspiegel geplant war, eine erwähnenswerte Besonderheit. Im

Gegensatz dazu liegen die geplanten Endlager in Europa meist unterhalb der Grundwasser führenden Schichten. Das Grundwasser dieser Schichten wird dann im Amargosa Tal von der Bevölkerung als Trinkwasser und zur Bewässerung verwendet (EPRI, 2009). Die Eigenschaften der Biosphäre zur Erstellung eines Modells wurden mit Hilfe der BIOMASS Methodologie entwickelt (IAEA, 2003).

Neben der Darstellung des Modellierungsansatzes für Geosphäre und Biosphäre enthält IMARC die Begutachtung und Modellierung des längerfristigen Verhaltens der Barriersysteme im Endlager und die Modellierung der „Near Field“ geologischen Eigenschaften des Endlagers. Als Endpunkt wird die zeitabhängige Belastung einer exponierten Population berechnet, da die Radionuklide nach dem Versagen der Lagerbehälter zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Biosphäre ankommen.

2.8.2 Forsmark, Schweden

Forsmark ist ein Endlager zur Aufnahme von schwach- und mittelradioaktivem Abfall. Zur Genehmigung für die zukünftige Lagerung von hochradioaktivem Abfall entwickelt die schwedische Gesellschaft für Atomenergie- und Abfallverwaltung SKB (Svensk Kärnbränslehantering) Modelle zur Abschätzung der längerfristigen Auswirkungen der gelagerten Abfälle auf die Biosphäre. Im März 2011 wurde von der SKB ein Antrag zur Genehmigung der Konstruktion für das Endlager in Forsmark eingereicht. Wenn diesem Antrag stattgegeben wird, sollen die Konstruktion des Endlagers 2015 und die Endlagerung 2025 beginnen.

Eine besondere Eigenschaft des gesamten fennoskandischen Schildes und damit der Region um Forsmark ist die Landhebung nach der letzten Eiszeit. Aufgrund des Abschmelzens der Eisplatten, die die Erdkruste während der letzten Eiszeit nach unten gedrückt haben, hebt sich das Land. Obwohl sich das Endlager im Moment im Granitgestein unter der Ostseeküste befindet, muss aufgrund der postglazialen Landhebung damit gerechnet werden, dass in mehreren tausend Jahren die Umgebung über dem Endlager verlandet. Aus diesem Grund wurden sowohl aquatische, als auch terrestrische Ökosysteme und deren Übergänge modelliert. Die exponierte Bevölkerung deckt ihren Wasserbedarf sowohl mit Brunnenwasser, als auch mit See und Flusswasser aus dem Endlagergebiet (SKB, 2011).

Als Endpunkte werden Landschafts-Dosis-Faktoren (LDF) für eine exponierte Gemeinschaft, die in Zukunft auf dem verlandeten Gebiet leben wird, berechnet (Avila und Ekström, 2006; Avila et al., 2010). Mit den für die Geosphäre berechneten Stoffflüssen ergeben diese LDF jährliche Dosen für die exponierten Bevölkerungsgruppen. Laut den schwedischen Vorgaben soll das zusätzliche jährliche Risiko für ein Mitglied der exponierten Gruppe 10^{-6} nicht überschreiten. Die SKB verwendet die ICRP 60 Vorgaben eines Grenzwertes von 0,073 pro Sv für erhöhte Krebswahrscheinlichkeit und erbliche Effekte und errechnet ein effektives Dosislimit von 0,014 mSv pro Jahr. Die in ICRP 103

vorgeschlagene Wahrscheinlichkeit von 0.057 pro Sv ist noch nicht in die schwedische Gesetzgebung eingeflossen (ICRP, 1990, 2007; SKB, 2011).

Die Exposition von nicht menschlichen Lebewesen wird ebenfalls beurteilt, um den Schutz dieser Lebensformen zu gewährleisten (Torudd, 2010). Zusammen mit den jetzigen geologischen Eigenschaften des Endlagers und den projizierten geologischen und klimatischen Entwicklungen während des Einlagerungszeitraumes kann somit die potentielle Exposition durch Radionuklide aus dem geplanten Endlager für hochradioaktiven Abfall auf die Biosphäre abgeschätzt werden (SKB, 2011).

2.8.3 Olkiluoto, Finnland

Olkiluoto ist eine kleine Insel vor der Küste Finnlands und Standort eines Endlagers für schwach- und mittelradioaktiven Abfall. Im Rahmen des Beurteilungsprozesses wird im Moment eine unterirdische Anlage (ONKALO) zur Untersuchung der Gesteinsformationen und Weiterentwicklung von Endlagertechnologien bis in eine Tiefe von 400 m errichtet (Posiva, 2010). Im Moment wird von Posiva Oy ein Antrag zur Erteilung einer Konstruktionslizenz für Olkiluoto vorbereitet. Diese soll Ende 2012 eingereicht werden. Das Ziel der Beurteilung ist die Beschreibung der aktuellen, zukünftigen und relevanten vergangenen Prozesse in der Umgebung von Olkiluoto.

Der jetzige Zustand der Biosphäre, sowie mögliche Entwicklungen des Endlager Gebietes in Bezug auf die Ausbreitung von Radionukliden, wurden für den Einlagerungszeitraum beurteilt und modelliert (Hjerpe et al., 2009; Ikonen et al., 2008). Dabei wurden, aufgrund der Nähe der Endlagerstädte zur Ostsee, neben terrestrischen Ökosystemen auch aquatische Ökosysteme modelliert. Ähnlich wie in Schweden wird die postglaziale Landhebung mit berücksichtigt. Für Olkiluoto wurde ein Bericht zur Beschreibung der Biosphäre angefertigt, der standortspezifische Daten für die Modellierung beschreibt (Haapanen et al., 2009).

Dabei werden der Transport von Radionukliden aus dem Endlager durch die Geosphäre in die Biosphäre, die Umweltbedingungen um das Endlager und eventuelle Auswirkungen auf Menschen und andere Lebewesen (Non Human Biota) beurteilt. Als primärer Transportweg wurde kontaminiertes Grundwasser angenommen. Es werden unterschiedliche Szenarien, wie etwa Urbanisierung oder eine Änderung zu wärmerem Klima, berücksichtigt.

Um den Schutz der Bevölkerung zu gewährleisten, soll die jährliche Dosis für die am meisten exponierte Gruppe 0,1 mSv pro Jahr nicht überschreiten. Für andere Lebewesen sollen die im PROTECT Projekt angegebenen Dosen von 2 µGy pro Stunde für Wirbeltiere, 70 µGy pro Stunde für Pflanzen und 200 µGy pro Stunde für Wirbellose nicht überschritten werden (Andersson et al., 2008).

2.8.4 Bruce, Kanada

Die NWMO (Nuclear Waste Management Organization) untersucht in Kanada im Auftrag der OPG (Ontario Power Generation) das Gebiet um das Kernkraftwerk Bruce für die Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfall. Im April 2011 wurde ein Bericht zu den Auswirkungen des Endlagers auf die Umwelt erstellt und einem Ausschuss der kanadischen Regierung zur Bewertung übergeben. Sollte dieser Bericht nach öffentlicher Begutachtung gebilligt werden, kann die Konstruktion des Endlagers 2013 beginnen. Die Konstruktion des Endlagers soll voraussichtlich sieben Jahre in Anspruch nehmen.

Als Grenzwert zur Belastung der exponierten Gruppe werden dabei 0,3 mSv pro Jahr angenommen (Walke et al., 2009). Ebenso wird die Auswirkung auf nichtmenschliche Lebewesen beurteilt. In dem Biosphären-Modell wird angenommen, dass die zukünftige Landnutzung in dem Endlagergebiet primär landwirtschaftlich geprägt ist. Es werden bäuerliche Haushalte und einheimische Bevölkerungsgruppen betrachtet, die Nahrungsmittel in dem Gebiet anpflanzen und Brunnenwasser zur Bewässerung und als Trinkwasser verwenden. Das aus den Brunnen entnommene Grundwasser ist dabei, zusammen mit verdünntem Grundwasser aus dem nahegelegenen Lake Huron, die primäre Quelle für Radionuklide (Little et al., 2011b; Walke et al., 2009).

In dem Gutachten werden mögliche zukünftige Klimaentwicklungen mit berücksichtigt. Eine Gletscherbildung 100.000-120.000 Jahre in der Zukunft wird angenommen, hat aber keine Einflüsse auf die tiefen geologischen Schichten (Little et al., 2011b; OPG, 2011).

2.8.5 Großbritannien

Die Möglichkeiten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in geologischen Formationen werden von der NDA (Nuclear Decommissioning Authority) für Großbritannien untersucht. Nach der Veröffentlichung eines Rahmenberichtes zur Implementierung eines Endlagers (DECC, 2008) haben drei lokale Behörden (Allerdale Borough Council, Copeland Borough Council und Cumbria County Council) Interesse daran bekundet, mit der Regierung weitere Studien durchzuführen. In dem Zeitplan für zukünftige Entwicklungen sind 4 Jahre für theoretische Studien, 10 Jahre für seismische und Oberflächenuntersuchungen und 15 Jahre für weitere Forschung, Konstruktion und Inbetriebnahme angesetzt (DECC, 2011).

2.8.6 Frankreich

Die Planung und Durchführung der Lagerung von radioaktiven Abfällen wird in Frankreich von ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) durchgeführt. 2009 übergab ANDRA der französischen Regierung einen Bericht, in dem verschiedene Studien zur Konstruktion eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle nahe dem Untertagelabor bei Bure vorgestellt

wurden (Andra, 2009a). Neben Endlagertechnologien und geologischen Gegebenheiten wurden mögliche klimatische Entwicklungen in den nächsten 10^6 Jahren und der Transfer von Radionukliden durch die Biosphäre betrachtet.

Als weitere Projektziele sind die Vorstellung wissenschaftlicher und technischer Dokumentationen 2012, gefolgt von einer öffentlichen Debatte und der Beantragung einer Lizenz für das Endlager 2014 geplant (Andra, 2009b, 2010). Da der Großteil der vorhandenen Literatur und Berichte nur in französischer Sprache vorhanden sind, ist eine weitere Auswertung im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich.

2.9 Biosphärenmodellierung in Schweden, Kanada und Deutschland

2.9.1 Biosphärenmodellierung in Schweden

Die Biosphärenmodellierung in Schweden ist, da sie ortsspezifisch zuerst für die Gegend um Laxemar und Forsmark, mit einer späteren Konzentration auf den Standort Forsmark, durchgeführt wurde, in einem fortgeschrittenen Stadium. Durch diese Konzentration auf einen Standort ist es möglich, für die Biosphärenmodellierung notwendige Landschafts- und Biosphärenparameter genau zu bestimmen und Expositionspfade zu definieren.

Da die Landschaftsmerkmale der untersuchten Gegend um Forsmark bekannt sind, konnten verschiedene Gebiete in sogenannte Biosphärenobjekte zusammengefasst werden, die durch Landschaftsform und Landnutzung definiert sind. Zu diesen Landschaftsformen zählen terrestrische (Löfgren, 2010), marine (Aquilonius, 2010) und limnische (Andersson, 2010) Ökosysteme. Anschließend wurden Biosphärenmodelle aufgestellt, die alle relevanten Stoffflüsse innerhalb dieser Biosphärenobjekte berücksichtigen (Lindborg, 2010).

Zur Abschätzung der Auswirkungen eines Endlagers auf die Biosphäre wurde die in dem BIOMASS Projekt vorgestellte Referenzbiosphären Methodik verwendet (IAEA, 2003). Als Ergebnis der Biosphärenmodellierung wurden landschaftsspezifische Dosiskonversionsfaktoren (LDF) berechnet. Diese repräsentieren die jährliche Dosis mit einer Einheit Sv/a pro Bq/a für ein repräsentatives Mitglied der am stärksten exponierten Gruppe, die durch eine konstante oder pulsartige Freisetzung einer normierten Menge von Radionukliden herrührt. Zusätzlich werden die Auswirkungen auf nicht menschliche Lebensgemeinschaften abgeschätzt (Avila et al., 2010).

Bei der Berechnung der LDF wurden ebenfalls mögliche Veränderungen der Biosphäre während des Einlagerungszeitraumes berücksichtigt. Dazu zählen sowohl eine Änderung der Landschaft durch die Landhebung der fennoskandischen Platte als auch Klimaänderungen durch Kalt- und Warmzeiten (Andersson, 2010; Aquilonius, 2010; Löfgren, 2010; SKB, 2010b).

Die Dosis für die exponierte Gruppe berechnet sich in dem schwedischen Modell durch die interne Exposition, die in Inhalation und Ingestion von

Radionukliden aufgeteilt wird und aus der externen Exposition. Für die Exposition durch Inhalation wird ein ganzjähriges Einatmen von mit Radionukliden kontaminierter Außenatmosphäre angenommen, für die Exposition durch Ingestion die Aufnahme von kontaminiertem Trinkwasser, sowie pflanzlicher und tierischer Nahrung aus dem Gebiet um das Endlager. Die Nahrungsmittel werden sowohl aus naturbelassenen Landschaften in Form von Fisch, Beeren, Pilzen und Wild, als auch aus landwirtschaftlich genutzten Flächen gewonnen. Eine Exposition durch Verbrennen von pflanzlichem Material und anschließendem Einatmen von Verbrennungsrückständen wird nicht betrachtet. Die externe Exposition durch Aufenthalt auf kontaminiertem Land und Wasser wird modelliert, ist aber im Vergleich zu der internen Exposition gering. Eine externe Exposition durch das Tragen von Kleidung, die mit kontaminiertem pflanzlichen und tierischen Material hergestellt worden ist, wird nicht berücksichtigt, da diese als vernachlässigbar angenommen wird (Avila et al., 2010).

Da das Untersuchungsgebiet bekannt ist, konnte ein komplexes Biosphärenmodell aufgestellt werden, das die Interaktionen folgender Kompartimente berücksichtigt: Geosphäre als Radionuklidquelle, Regolith, Primärproduzenten, Destruenten, Filtrierer, Herbivore, Karnivore, Menschen, Wasser im Regolith, Oberflächenwasser, Wasserzusammensetzung, lokale Atmosphäre, Temperatur, Radionuklide und externe Bedingungen als Senke. Eine vollständige Interaktionsmatrize der Expositionspfade ist in SKB TR-10-09 zu finden. Die Definition der Parameter der notwendigen Biosphärenprozesse wurde entweder durch ortsspezifische Messungen oder durch die Verwendung von Literaturwerten durchgeführt. Der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Endergebnis wurde mit Hilfe von Unsicherheitsanalysen abgeschätzt (Norden, 2010; SKB, 2010a).

2.9.2 Biosphärenmodellierung in Kanada

Der Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager Bruce, Kanada, in dem leicht und mittelradioaktive Abfälle gelagert werden sollen, wurde mit einer stilisierten Referenzbiosphären Methodologie nach BIOMASS durchgeführt (IAEA, 2003). Bei der Modellierung wurden sowohl der Radionuklidtransport über das Grundwasser als auch gasförmig durch verschüttete Zugangs- und Ventilationsschächte berücksichtigt. Bei der Exposition durch den Transport in der Gasfraktion dominiert C-14. Das kontaminierte Grundwasser gelangt entweder über den nahegelegenen Lake Huron, oder über oberflächennahes und mit Brunnen abstrahiertem Grundwasser in die Biosphäre (Little et al., 2011b; Walke et al., 2011).

Als mögliche Szenarien wurden ein zwischeneiszeitliches Klima, das dem heutigen Klima gleicht, und ein Tundra Klima angenommen (Walke et al., 2011). Die Biosphäre während einer glazialen Überdeckung wurde nicht modelliert, es wurde jedoch ein maximaler Bodenabtrag von 100-200 Metern im Bereich des Endlagers angenommen (Hallet, 2011).

Als hauptsächlich exponierte Gruppe wird eine sich selbstversorgende Familie, zwei Erwachsene, ein Kind und ein Kleinkind, angenommen, die ihre gesamten

Nahrungsmittel und Trinkwasser aus dem Bereich oberhalb der Haupt- und Ventilationsschächte des Endlagers gewinnt und sich dort ganzjährig aufhält. Zusätzlich wird die Exposition für Personen abgeschätzt, die ihr Trinkwasser und Speisefisch aus dem Lake Huron in größerer Entfernung gewinnen und die Auswirkungen auf nicht menschliche Lebensgemeinschaften wurden ebenfalls abgeschätzt (Walke et al., 2011).

Das Modell integriert die Vorgänge innerhalb des Endlagers mit denen außerhalb des Endlagers in der Geosphäre und Biosphäre. Als Endpunkt der Modellierung werden Radionuklidflüsse innerhalb und außerhalb des Endlagers, Radionuklidkonzentrationen in verschiedenen Medien und jährliche Dosen für die exponierte Gruppe berechnet (Little et al., 2011b).

Als Expositionspfade für den Menschen werden in der Biosphäre die Aufnahme von kontaminiertem Trinkwasser, Nahrung und Erdpartikeln, Inhalation von Staub und gasförmigen Radionukliden, Aufenthalt auf kontaminiertem Land und Baden im Lake Huron angenommen. Eine mögliche Exposition durch Medikamente, kontaminiertes Baumaterial, Kleidung aus tierischen und pflanzlichen Produkten und die Verbrennung von kontaminiertem Pflanzenmaterial wurde in vorhergehenden Projekten modelliert, allerdings für den endgültigen Langzeitsicherheitsnachweis verworfen, da diese nur sehr geringe Beiträge zur Gesamtexposition liefern (Garisto et al., 2004; Little et al., 2011a).

2.9.3 Biosphärenmodellierung in Deutschland

Im Gegensatz zu Schweden ist in Deutschland noch kein Standort für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle festgelegt. Allerdings werden mehrere Standorte aufgrund ihrer geologischen Eigenschaften für ihre Eignung als Endlager geprüft. Aus diesem Grund sind Projekte zur Biosphären Modellierung etwas stilisierter als in anderen Ländern, da genaue Untersuchungen zu den Biosphäreneigenschaften an den möglichen Standorten oft noch nicht durchgeführt wurden.

Frühere Bemühungen Referenzbiosphärenmodelle nach der BIOMASS Methodologie in Deutschland durchzuführen werden zum Beispiel in BMU-2003-623 vorgestellt (Becker, 2003). Hier wird für den norddeutschen Raum ein Referenzbiosphärenmodell mit heutigem Klima und zusätzlich Referenzbiosphärenmodelle für potentielle zukünftige Klimazustände erstellt. Als exponierte Gruppe wird hier eine kleine selbstversorgende bäuerliche Gemeinde angenommen, die Strahlenexposition wird für einen repräsentativen Erwachsenen berechnet.

Der Eintrittspunkt für Radionuklide in die Biosphäre ist das Grundwasser, welches aus Brunnen gewonnen wird und sowohl als Trinkwasser für Mensch und Tier als auch zur Bewässerung von Freilandkulturen und Unter-Glas Kulturen verwendet wird. Fisch wird aus mit Grundwasser gespeisten und mit Regenwasser verdünnten Oberflächengewässern entnommen. Auf Überschwemmungsgebieten dieser Oberflächengewässer werden Beeren und andere Pflanzen zum Verzehr gewonnen und Viehzucht betrieben (Becker, 2003).

Die Exposition der repräsentativen Person geschieht durch die Ingestion von pflanzlicher und tierischer Nahrung, von kleineren Mengen Erde an ungewaschener pflanzlicher Nahrung, Inhalation von Staubpartikeln in der Luft und im Wasserdampf sowie einer externen Exposition durch den Aufenthalt auf kontaminiertem Land (Becker, 2003).

2.9.4 Zusammenfassung vorhergehender Arbeiten und neue Ansätze

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in vorangegangenen internationalen und deutschen Arbeiten Referenzbiosphärenmodelle sowohl für bestimmte Standorte (Little et al., 2011b; SKB, 2011) als auch für generische Referenzbiosphären erstellt worden sind (Becker, 2003; Olyslaegers et al., 2005). Dabei wurde vorwiegend die BIOMASS Methodologie zur Erstellung der Biosphärenmodelle verwendet (IAEA, 2003). Als Expositionspfade werden die Aufnahme von kontaminierter Nahrung aus landwirtschaftlich genutzten und naturbelassenen Gebieten, die Inhalation von staubgebunden Radionukliden und die externe Exposition durch Aufenthalt auf kontaminiertem Land betrachtet. Zusätzlich berücksichtigen einige Modelle die Aufnahme von kontaminiertem Boden über ungewaschene Nahrungsmittel (Becker, 2003). Exposition durch Kleidung aus kontaminiertem pflanzlichem und tierischem Material, Baumaterial, Medikamenten und der Verbrennung von pflanzlichem Material wird allgemein als wenig relevanter Expositionspfad angesehen und nicht berücksichtigt (Avila et al., 2010; Garisto et al., 2004; Little et al., 2011a). Es werden dabei verschiedene Szenarien zur Landschaftsnutzung sowie Landschafts- und Klimaentwicklung berücksichtigt und entsprechende Biosphärenmodelle entwickelt

Diese Ansätze werden teilweise in der vorliegenden Arbeit verwendet und um folgende Punkte erweitert:

- Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen für alle realistisch möglichen zukünftigen Klimazustände an nord- und süddeutschen Standorten.
- Stilisierte Abfolge dieser Klimazustände während des Einlagerungszeitraumes (BIOCLIM, 2004).
- Parametrisierung dieser Biosphärenmodelle durch international zugängliche und normierte Quellen (FAO, 2007, 2010; IAEA, 2009).
- Berechnung der $BDCF^S$ für die Bodentypen Sand, Lehm, Ton und organische Böden durch Verwendung entsprechender Transferfaktoren für subtropische, gemäßigte und boreale Klimazonen.
- Berechnung der $BDCF^W$ und $BDCF^S$ für die Altersgruppen Kleinkind, Kind und Erwachsener nach ICRP 101 und für unterschiedliche Ernährungsweisen.

3: Systemanalyse für Nord- und Süddeutschland

3.1: Charakterisierung der gegenwärtigen Situation (Ist-Zustand)

3.1.1: Kurzcharakterisierung

Förster *et al.* 2010 beschreiben in ihrer Studie drei Referenzregionen. Diese Regionen sind in Norddeutschland die Regionen Elbe und Weser/Aller und in Süddeutschland die Region Donau. Voraussetzung für die Auswahl eines Gebietes, war unter anderem das Vorhandensein von geologischen Ton- oder Salzformationen, in denen das Endlager eingerichtet werden kann.

Das Einrichten von Endlagern in Salz- oder Tonformationen hat den Vorteil, dass diese Formationen verformbar sind, was eine Rissbildung und Austritt von radioaktivem Material erschwert. Andere Gesteinsformationen wie etwa Granit im süddeutschen Raum haben dagegen oft den Nachteil, dass sie stark zerklüftet sind. Ein Nachteil der Lagerung von radioaktiven Abfällen in Salzstöcken ist die Möglichkeit der längerfristigen Auflösung des Salzstockes durch Grundwasser. Dieses ist allerdings eher unwahrscheinlich, da diese geologischen Formationen schon viele Millionen Jahre stabil bestehen.

Die Diskussion der geologischen Randbedingungen ist nicht Gegenstand dieses Projektes. In diesem Projekt wird nur der Transport der Radionuklide in den oberen von Pflanzenwurzeln durchdrungenen Bodenschichten und in der Biosphäre modelliert. Für diese Modellierung sind andere Faktoren, vor allem das Klima und die Art der oberen Bodenschichten von großer Wichtigkeit. Diese Faktoren bestimmen die in das Modell einfließenden Parameter. Auf dieser Basis wird die Auswahl der verschiedenen Referenzstationen und der dazugehörigen Modellparameter aufgrund ihrer klimaabhängigen Eigenschaften durchgeführt und erläutert.

Anschließend können die für ein Modell relevanten Parameter aus der Literatur zusammengetragen werden. Die Ableitung der Modelle folgt der BIOMASS-Methodologie (IAEA, 2003).

3.1.2: Topographie im nord- und süddeutschen Raum

Die nord- und süddeutschen Referenzregionen unterscheiden sich in ihren topographischen Eigenschaften. Auf die geomorphologischen Unterschiede wird ausführlich in Förster 2010 eingegangen. Für das Biosphärenmodell ist relevant, dass die Landschaften in den norddeutschen Referenzregionen ein einheitlich flacheres Relief aufweisen als die stark heterogene Landschaft in der süddeutschen Referenzregion.

Da flaches Land für die landwirtschaftliche Nutzung von Vorteil ist, ist der Anteil der Gesamtfläche, die in den norddeutschen Referenzregionen landwirtschaftlich genutzt wird, mit etwa 60% größer als der Anteil in Süddeutschland mit 45 bis 50% (**Tabelle 1**). Entsprechend größer ist der Anteil von Waldflächen in der südlichen Referenzregion. Dazu kommt, dass in

Norddeutschland etwa drei Viertel der landwirtschaftlichen Fläche als Ackerland genutzt wird und ein Viertel als Dauergrünland zur Viehzucht. In Süddeutschland ist der Anteil des Dauergrünlandes mit etwa einem Drittel der Gesamtfläche höher und der Anteil des Ackerlandes mit etwa zwei Dritteln der Gesamtfläche niedriger als in Norddeutschland (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Verteilung der Nutzungsarten der Gesamtbodenflächen in den Bundesländern, die die nord- und süddeutschen Referenzregionen beinhalten (Statistisches-Bundesamt, 2010).

km ²	Bodenfläche gesamt	Gebäude und Freiflächen	Betriebs- fläche	Erholungs- fläche	Verkehrs- fläche	Landwirtschaftsfläche			Wald- fläche	Wasser- fläche	An- dere
						Zusammen	Moor	Heide			
Baden- Württem- berg	35751	2682	112	298	1947	16420	21	13	13676	382	236
Bayern	70550	3987	266	367	3358	35005	204	56	24703	1439	1425
Nieder- sachsen	47627	3436	339	428	2415	28743	565	196	10239	1106	920
Sachsen Anhalt	20448	906	161	514	773	12693	1	157	4927	433	41
%	Bodenfläche gesamt	Gebäude und Freiflächen	Betriebs- fläche	Erholungs- fläche	Verkehrs- fläche	Landwirtschaftsfläche			Wald- fläche	Wasser- fläche	An- dere
						Zusammen	Moor	Heide			
Baden- Württem- berg	100	7.5	0.3	0.8	5.4	45.9	0.06	0.04	38.3	1.1	0.7
Bayern	100	5.7	0.4	0.5	4.8	49.6	0.29	0.08	35.0	2.0	2.0
Nieder- sachsen	100	7.2	0.7	0.9	5.1	60.4	1.19	0.41	21.5	2.3	1.9
Sachsen -Anhalt	100	4.4	0.8	2.5	3.8	62.1	0.00	0.77	24.1	2.1	0.2

Qualitativ werden in den norddeutschen Referenzregionen größere zusammenhängende Flächen landwirtschaftlich genutzt. Die zusammenhängenden, landwirtschaftlich genutzten Flächen in der süddeutschen Referenzregion sind kleiner und werden immer wieder von Waldstücken voneinander getrennt. Gut zu erkennen ist dieser Unterschied auf topographischen Karten und Luftbildern der Referenzregionen Weser/Aller und Donau (**Abbildung 1 und 2**).

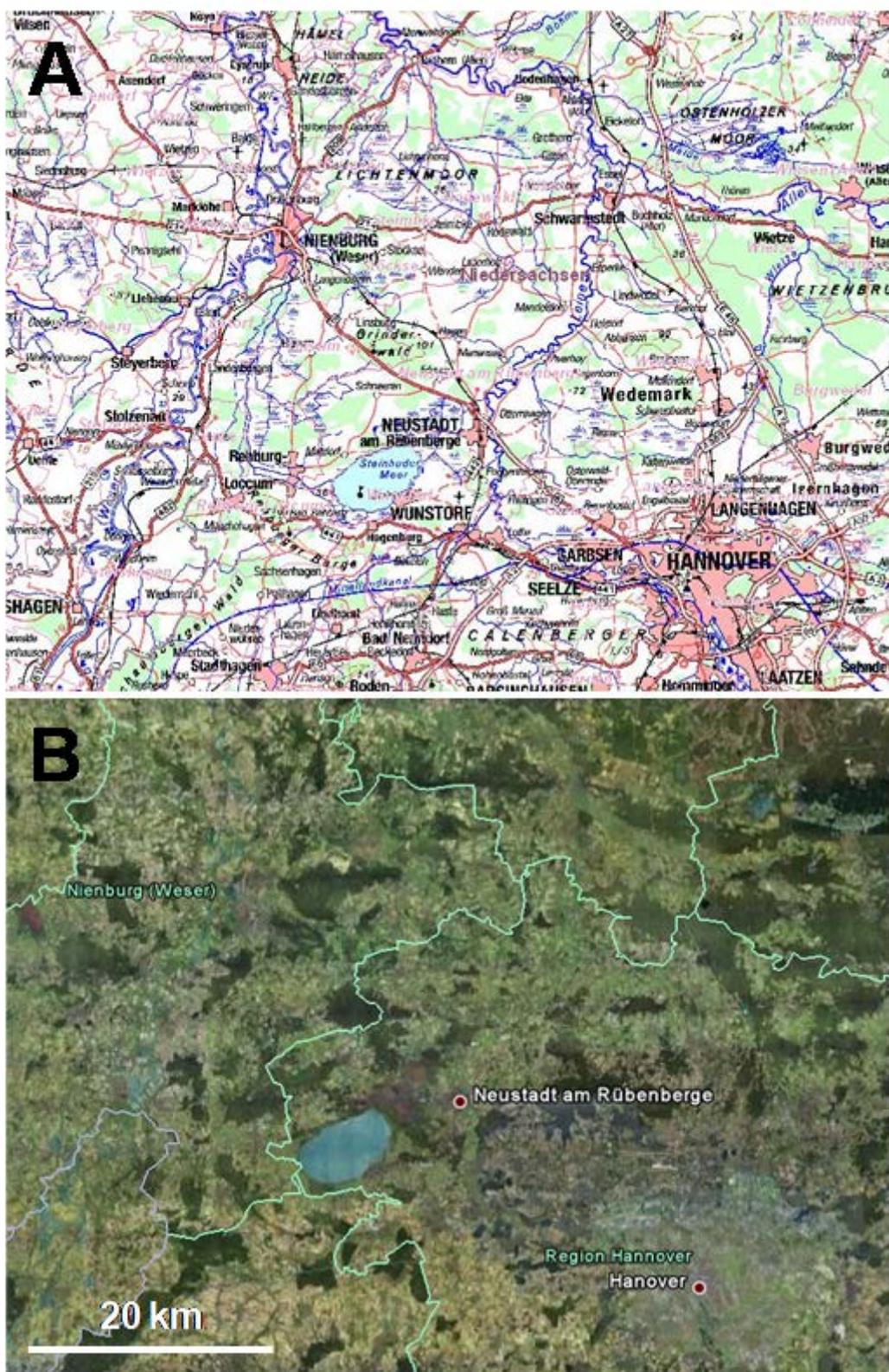


Abbildung 1: A) Topographische Karten der Referenzregion Weser/Aller (Geoview, 2011). In Grün sind Waldflächen, in Weiß landwirtschaftlich genutzte Flächen dargestellt. Im Vergleich dazu zeigt B) Luftaufnahmen derselben Referenzregionen (Google, 2011).

3.1.3: Moore und Austrocknung von Seen

Tritt Grundwasser an die Oberfläche, können je nach Landschaftsform Moore und Seen entstehen. Je nach Nährstoffgehalt werden Seen als eutroph oder oligotroph klassifiziert. In oligotrophen Seen kommt es zu keiner nennenswerten Ablagerung von organischen Substanzen auf den Seeböden. Trocknen diese Seen aus, oder werden sie von Menschen trockengelegt, bleibt ein kiesiger, sandiger, lehmiger oder toniger Boden zurück, der für die Landwirtschaft genutzt werden kann. Oligotrophe Seen finden sich vor allem in kalten Regionen mit steinigem Untergrund. In eutrophen Seen lagern sich organische Substanzen in den so genannten Mudden ab. Werden diese Seen trockengelegt, bleibt ein Boden mit hohem Anteil an organischen Substanzen zurück.

Eine weitere Möglichkeit zur Verlandung von Seen ist die so genannte Versumpfung, bei der sich die Tiefe des Sees durch Sedimentation verringert und Pflanzen vom Ufer aus den See zuwachsen. Durch die Versumpfung entstehen mit der Zeit Moore (**Abbildung 3**).

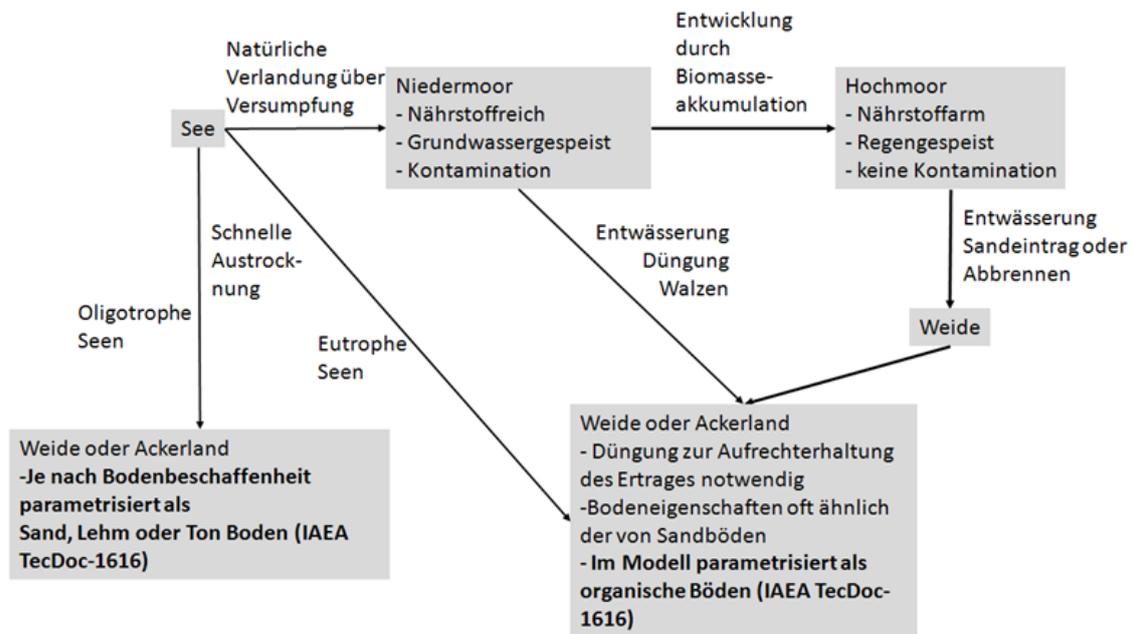


Abbildung 3: Schematische Entwicklung von Seen und Mooren hin zur landwirtschaftlichen Nutzung.

Als Moor werden allgemein Gebiete bezeichnet, in denen es aufgrund eines hohen Wassergehaltes im Boden nur zu einer unvollständigen Zersetzung von abgestorbenem pflanzlichen Material und dessen Akkumulation zu Torf kommt. Torf besteht aus nicht vollständig zersetzten organischen Ablagerungen, deren Struktur teilweise noch erkennbar ist. Das Ökosystem Moor wird allgemein in zwei Kategorien, Hochmoor und Niedermoor, aufgeteilt. Regengespeiste Hochmoore kommen dabei vor allem im norddeutschen, küstennahen Bereich und im Voralpenland vor (Gore, 1983; Göttlich, 1990; Succow und Joosten, 2001). Die Unterscheidung in Hoch- und Niedermoore ist für die

radioökologische Beurteilung von Mooren oder von aus diesen Mooren gewonnenen landwirtschaftlichen Flächen relevant.

Niedermoore sind Gebiete, die hauptsächlich durch Grundwasser- oder Oberflächenwasserspeisung, d.h. Flüsse und Seen, über längere Zeit eine hohe Wassersättigung des Bodens aufweisen. Dabei versorgt das Grundwasser die Biosphäre mit pflanzenphysiologisch relevanten Nährstoffen, wie Kalium, Calcium oder Phosphat, aber auch mit eventuell aus einem Endlager austretenden Radionukliden (Göttlich, 1990; Succow und Joosten, 2001).

Im weiteren Verlauf können sich Niedermoore mit der Zeit durch die Akkumulation von nicht zersetztem Pflanzenmaterial und dem Wachstum bestimmter Pflanzenarten wie zum Beispiel *Sphagnum* Moosen zu Hochmooren entwickeln. Diese sind aufgrund ihrer erhöhten Lage von einer Grundwasserspeisung abgeschnitten. Hier wird das für das Pflanzenwachstum benötigte Wasser ausschließlich durch Regenwasser bereitgestellt. Dementsprechend nennt man derartige Moore auch ombotroph. Eine derartige Entwicklung setzt eine hohe Wassersättigung des Bodens über mehrere hundert bis tausend Jahre voraus (Succow und Joosten, 2001).

Da das Regenwasser arm an relevanten Ionen, wie zum Beispiel Kalium ist, ist die Kaliumkonzentration in Hochmoorböden sehr gering. Zudem binden die organischen Moorböden zum Beispiel Natrium und Kalium nur sehr schwach, was zu einer leichten Auswaschung dieser Ionen führt. Niedermoore weisen Kaliumkonzentrationen von 0.04-0.35%, Hochmoore von 0.01-0.09% auf. Der größte Teil des Kaliums ist in Hochmooren in pflanzlichem Material gebunden. Solange es zu keinem Export von Pflanzenmaterial aus dem Hochmoor, etwa durch Beweidung, kommt, ist der Kaliumkreislauf dort in sich geschlossen. Bei einem Export von Biomasse ohne nachfolgende Düngung kommt es deshalb schnell zur Verarmung dieser Böden. Dem kann durch zusätzliche Düngung entgegengewirkt werden. Bei einem hohen Durchschlickungsgrad in Niedermooren kann die Kaliumkonzentration dort aufgrund der Bindung von Kalium an Tonpartikel auch ohne zusätzliche Kaliumzufuhr durch das Grundwasser höher sein (Succow und Joosten, 2001).

Kommt es nun durch Fallout zu einer Kontamination eines Hochmoores, zum Beispiel durch Cäsium, kann es aufgrund des Kaliummangels in den Moorböden zu einer starken Kontamination der Pflanzen aufgrund einer erhöhten Aufnahme von Cäsium kommen (Bunzl und Kracke, 1989; Ehlken und Kirchner, 2002; Rosen et al., 2009). Da diese Lebensräume definitionsgemäß vom Grundwasser abgeschnitten sind, spielen sie aber für eine Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern in geologischen Formationen keine Rolle, solange sie nicht stark für die landwirtschaftliche Nutzung verändert werden, d.h. solange sie nicht bewässert werden oder durch Biomasseabtrag und -verdichtung wieder unter Grundwassereinfluss fallen.

In nicht kultivierten Mooren können hohe Transferfaktoren Boden zu Pflanze für Cäsium, zum Beispiel 1,35 für Heidekraut (Rosen et al., 2009) oder 1,9 für Rasenbinse mit starken jahreszeitlichen Variationen (Bunzl und Kracke, 1989) gemessen werden. Kommt es zum Ackerbau auf ehemaligen Moorgebieten und

somit sowohl zur Entwässerung und zur Anpassung des Boden pHs und der Nährstoffkonzentration durch Düngung, gleichen sich die Transfer Faktoren für Feldfrüchte, wie Getreide, Kartoffeln, Mais und Gemüse den Transferfaktoren von Sandböden an. Ein Beispiel hierfür ist der Transferfaktor Boden-Getreide von Cäsium mit 0,39 für Sandböden und 0,11 für organische Böden. Bei ungedüngten Wiesen liegen die Transferfaktoren Boden zu Gras mit 0,084 für Sandböden und 0,28 für organische Böden weiter auseinander (IAEA, 2009).

Niedermoore weisen, im Gegensatz zu den vorwiegend sauren Hochmooren, abhängig von den Eigenschaften des örtlichen Grundwassers, eine weite Bandbreite von Boden pH Werten auf. Diese können zwischen 3,5 und 8,5 liegen (Succow und Joosten, 2001). Aus diesem Grund kann es zum Ausfällen und zur Akkumulation von im Grundwasser gelösten Stoffen kommen. Dadurch können sich Materialansammlungen etwa in Form von Wiesenkalk oder Raseneisenerz bilden. Metallionen können durch Bindung mit den Huminstoffen der organischen Böden in einer Chelatform immobilisiert werden. Entsprechend kann eine Akkumulation von Radionukliden in Niedermooren über deren Lebenszeit nicht ausgeschlossen werden.

Je nach Entstehungsgeschichte und Landschaftsform kann man Niedermoore in unterschiedliche Klassen aufteilen. Verlandungsmoore entstehen durch das Zuwachsen von Gewässern mit pflanzlichem Material. Bei der Auffüllung von Senken mit Wasser entstehen Versumpfungsmoore. Bei einem stetigen Wasseranstieg um Gewässer können Überflutungsmoore entstehen. Durchströmungsmoore bilden sich vor allem in Flussauen. Hangmoore entstehen an Austrittstellen von oberflächennahem Bodenwasser und Quellmoore an Austrittstellen von Grundwasser. Bei all diesen Moortypen muss die Wasserkonzentration des Bodens über lange Zeiträume hoch genug bleiben, dass es zur Torfbildung kommt. Periodische Austrocknung kann die Moorbildung verhindern, da akkumuliertes Pflanzenmaterial dann komplett abgebaut werden kann. In Deutschland stellen Verlandungsmoore und Versumpfungsmoore den größten Teil der noch vorhandenen Moorgebiete. Die Hochmoore der Voralpen und des Küstenraumes wurden zum größten Teil in den letzten Jahrhunderten zu landwirtschaftlich genutzten Flächen umgewandelt (Succow und Joosten, 2001).

Im Zuge der Industrialisierung im 19. und 20. Jahrhundert wurden in Deutschland je nach Gebiet bis zu 90% der vorhandenen Moorfläche zu landwirtschaftlichen Nutzflächen umgewandelt. Etwa 10% der Landwirtschaft in Deutschland wird auf derartigen organogenen Böden betrieben. 60% der ehemaligen Moorgebiete werden als Weideland genutzt, der Rest wird als Ackerland, Wald und Torfabbaugebiet verwendet. Die Moore werden zuerst entwässert, wodurch die Torfbildung unterbrochen wird und sich der vorhandene Torf verdichtet und beginnt sich abzubauen. Anschließend können die Moorböden zur Erhöhung der landwirtschaftlichen Eignung des Bodens im Falle von Hochmooren mit Sand durchsetzt oder im Falle von Niedermooren mit Düngemitteln angereichert und gewalzt werden. Diese Behandlung ermöglicht die Verwendung von landwirtschaftlichen Maschinen für den Ackerbau und verbessert den Nährstoffhaushalt der Böden (**Abbildung 3**). Die entstehenden

Sandmisch- und Schwarzkulturen sind somit gut für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet. Allerdings ist für eine längerfristige Aufrechterhaltung der landwirtschaftlichen Nutzbarkeit eine zusätzliche Düngung dieser Böden oft notwendig, da organische Böden Nährminerale nur schlecht binden und es über längere Zeiträume zur Verarmung dieser Böden kommen kann (Göttlich, 1990).

Der abgebaute Torf wird in Deutschland hauptsächlich zur Bodenverbesserung verwendet. Etwa 60% werden zum gewerblichen Gartenbau, 25% in Kleingärten und 15% industriell genutzt. Die Torfverbrennung spielt gegenwärtig in Deutschland keine Rolle. Im Gegensatz dazu werden in Finnland und Irland 5-10% des gesamten Energiebedarfs durch Torfverbrennung gedeckt. Vor der industriellen Verwertung wird der Torf häufig zuerst zu Torfkoks veredelt (Göttlich, 1990; Succow und Joosten, 2001). Aus diesem Grund kann eine verstärkte zukünftige Nutzung von Torf als Brennstoff in Deutschland nach einer Änderung zu borealem Klima und Neubildung von Mooren zur Lieferung von Torf nicht ausgeschlossen werden. Eine weitverbreitete Nutzung als Brennmaterial in gemäßigten und subtropischen Klimaregionen ist jedoch unwahrscheinlich.

In Deutschland sind im Moment etwa 0,15%, in Finnland 19,2%, in Italien 0,01% und in Spanien 0,005% der Landfläche von Mooren bedeckt (Statistisches-Bundesamt, 2010; Succow und Joosten, 2001). Ein Großteil der ehemaligen Mooregebiete in Deutschland werden bereits landwirtschaftlich genutzt. Da die entsprechenden Böden zur Nutzung meist entwässert wurden, kommt es hier zu einem fortschreitenden Abbau der angesammelten organischen Substanz im Boden. Dadurch verlieren die entsprechenden Böden mit der Zeit ihren „Moorcharakter“. Durch die entwässerungsbedingte Verdichtung des Moorbodens ist auch eine Renaturierung dieser Böden zum ehemaligen Moorzustand extrem schwierig (Göttlich, 1990; Succow und Joosten, 2001)

Landwirtschaftlich genutzte ehemalige Moore werden in dem Modell mit der Bodenklasse „organisch“ berechnet. Die Berechnung einer möglichen Vorbelastung von Moorböden durch Radionuklide ist aufgrund der Verwendung von BDCF^S bei einer vorgegebenen Kontamination des Bodens mit 1 Bq/kg im Moment nicht möglich, wäre aber zur weiteren Optimierung des Modells wünschenswert. Bei bekannter Bodenaktivität kann dann auch die Belastung von Pflanzen aus Unterglaskulturen, die mit Torf gedüngt werden, abgeschätzt werden.

3.1.4: Klimatische Bedingungen

Innerhalb Deutschlands wurden drei Referenzklimastationen in den Regionen Weser/Aller, Elbe und Donau ausgewählt (Förster et al., 2010). Das Klima dieser Referenzstationen zeigt Unterschiede auf, die für das Modell von Bedeutung sind. Vor allem Niederschlag und Temperatur sind relevant, da diese die Menge der für die landwirtschaftliche Nutzung benötigten Bewässerung bestimmen.

Für die Referenzregion Elbe wurde die Klimastation Magdeburg, für die Referenzregion Weser/Aller die Klimastation Hannover und für die Referenzregion Donau die Klimastation Ulm verwendet. Die Niederschlagsmengen sind dabei in der Region Elbe mit 513 mm pro Jahr am niedrigsten. In der Mitte liegt die Region Weser/Aller mit 661 mm und am meisten Niederschlag fällt in der Region Donau mit 754 mm pro Jahr. Die Referenzklimastation Magdeburg zählt zu den trockensten in ganz Deutschland. Die Jahresdurchschnittstemperaturen sind in den nördlichen Referenzstationen ähnlich und im Süden im Schnitt etwa 1°C kühler (Müller, 1996). Die 30-Jahres-Mittelwerte der Klimadaten von 1961-1991 sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

3.1.5: Bewässerung in der Landwirtschaft

Das Wasserdefizit zur Bewässerung wird für jeden Monat nach **(1), Kapitel 6** berechnet (Achnich, 1980). Die Menge der Bewässerung fließt im derzeitigen Modell über die von den Blättern der landwirtschaftlich genutzten Pflanzen aufgenommenen Radionuklide in das Modell ein.

Tabelle 2: 30-Jahres-Mittelwerte der Klimadaten von 1961-1991 für die drei ausgewählten Referenzstationen in Deutschland

Magdeburg (Elbe)	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur [°C]	-0,5	-0,1	4,0	8,8	13,4	16,4	18,5	18,3	14,9	9,7	4,8	1,2	9,2
Niederschlag [mm]	36,0	31,0	29,0	35,0	49,0	58,0	64,0	57,0	38,0	43,0	40,0	33,0	513,0
Luftfeuchtigkeit [%]	84,0	82,0	76,0	70,0	67,0	67,0	70,0	71,0	74,0	79,0	85,0	87,0	76,0
Wasser Defizit [mm]	-41	-33	-13	10	29	44	53	57	43	-3	-31	-38	
Hannover (Weser/Aller)	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur [°C]	0,1	0,5	3,6	8,1	12,6	15,8	17,4	17,0	13,8	9,1	5,1	1,8	8,7
Niederschlag [mm]	48,0	46,0	38,0	48,0	52,0	64,0	84,0	73,0	54,0	56,0	52,0	46,0	661,0
Luftfeuchtigkeit [%]	86,0	85,0	80,0	73,0	72,0	73,0	76,0	78,0	80,0	84,0	87,0	89,0	90,0
Wasser Defizit [mm]	-55,0	-51,0	-28,2	-10,3	14,6	25,9	16,2	21,2	11,7	-26,0	-45,0	-52,6	
Ulm (Donau)	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur [°C]	-2,5	1,1	3,2	7,6	12,1	15,3	17,0	16,3	13,0	7,4	2,6	-1,2	7,5
Niederschlag [mm]	49,0	43,0	40,0	44,0	77,0	101,0	110,0	81,0	68,0	52,0	47,0	42,0	754,0
Luftfeuchtigkeit [%]	85,0	83,0	76,0	70,0	70,0	73,0	73,0	75,0	78,0	84,0	88,0	88,0	79,0
Wasser Defizit [mm]	-58,8	-44,2	-26,8	-5,2	-11,5	-15,2	-9,8	10,7	-5,8	-31,0	-50,0	-53,7	

Die Wachstumsperioden für die Referenzklimaregionen sind im **Kapitel 9.2, Tabelle 24** aufgeführt. Die durchschnittlichen Monatstemperaturen sollten für

einen effektiven Ackerbau über 10°C und unter 25°C liegen. Für die jährliche Bewässerungsmenge werden die Wasserdefizite der einzelnen Monate addiert, wobei ein negatives Wasserdefizit mit dem Wert 0 berücksichtigt wird. Deshalb müssen in den Regionen folgende Mengen an Grundwasser zur Bewässerung herangezogen werden:

- Elbe 223 l/m² a
- Weser/Aller 88 l/m² a
- Donau 11 l/m² a

Diese Berechnung geht davon aus, dass zur landwirtschaftlichen Nutzung nicht mehr als notwendig bewässert wird. Diese Annahme ist aufgrund der Kosten und dem Arbeitsaufwand von Bewässerung im großen Maßstab vertretbar (KTBL, 2009). Eine starke Überbewässerung kann kurzfristig nicht ausgeschlossen werden und würde zu einem gesättigten Wassergehalt im Boden führen. Es ist aber unwahrscheinlich, dass über den Einlagerungszeitraum von 10⁶ Jahren Überbewässerung in einer Region systematisch aufrechterhalten wird.

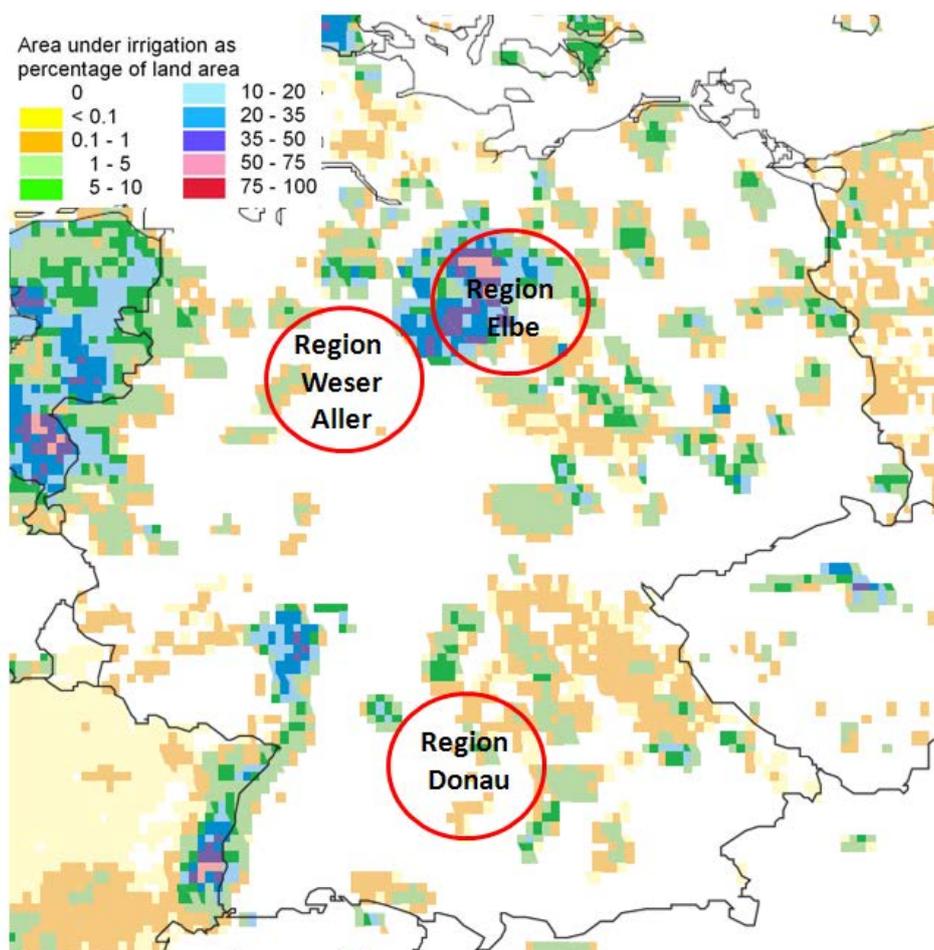


Abbildung 4: Prozentualer Anteil der landwirtschaftlichen Fläche mit Bewässerung in Deutschland (Siebert et al., 2005).

Da das Modell eine selbstversorgende Gemeinschaft als exponierte Gruppe annimmt, stammt das gesamte benötigte Wasser zur Bewässerung aus dem kontaminierten Grundwasser. Die Verdünnungseffekte durch Regenwasser sind bei dieser Berechnung schon berücksichtigt, da bei stärkerem Regen auch weniger kontaminiertes Wasser zur Bewässerung verwendet wird.

Im Vergleich zu anderen Ländern Europas wird in Deutschland durchschnittlich relativ wenig zusätzlich bewässert (Bannick et al., 2008; Siebert et al., 2007). Es gibt allerdings Gebiete in der Elbe Region, in denen relativ stark bewässert wird (**Abbildung 4**). Der verwendete Anteil von Oberflächenwasser und Grundwasser zur Bewässerung ist dabei in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich (**Abbildung 5**). In den Bundesländern, in denen die betrachteten Referenzregionen liegen, stammt der größte Teil des Wassers für landwirtschaftliche Zwecke aus entnommenem Grundwasser. In den Regionen Elbe und Weser/Aller ist der Grundwasseranteil etwa 90%, in der Region Donau etwa 70% (Statistisches-Bundesamt, 2004). Insgesamt ist der Anteil der landwirtschaftlich bewässerten Flächen in Deutschland mit 1,4% allerdings relativ gering.

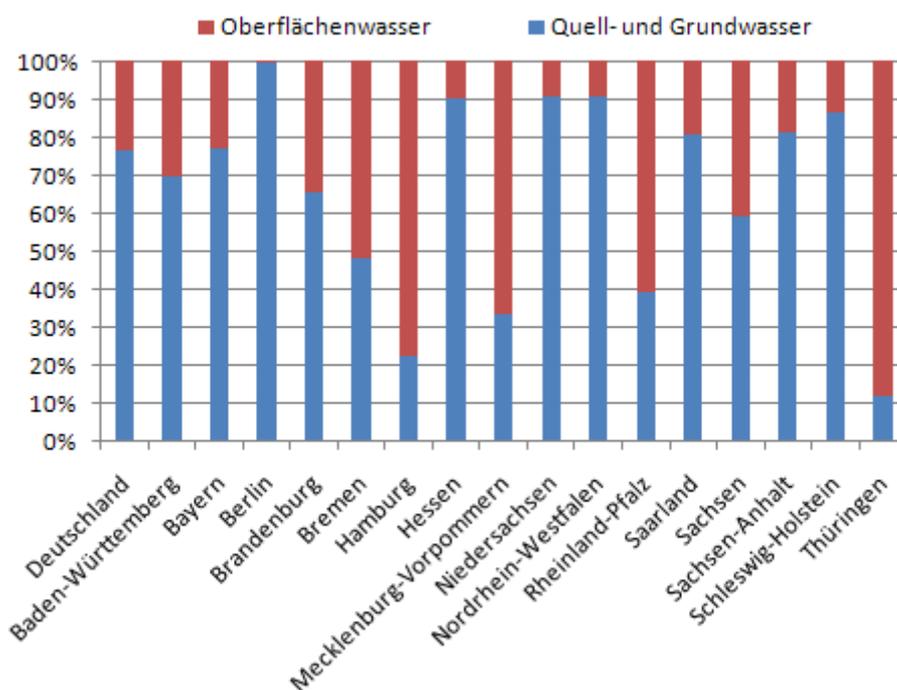


Abbildung 5: Wasseranteil an Grund- und Oberflächenwasser für die Bewässerung (Statistisches-Bundesamt, 2004).

3.1.6: Beschreibung der vorwiegenden Landnutzung in der Landwirtschaft

Aufgrund der unterschiedlichen topographischen Gegebenheiten der Referenzregionen in Deutschland (Förster et al., 2010) unterscheidet sich die Landnutzung in den entsprechenden Gebieten voneinander. Zur Definition der

Landnutzung in den nord- und süddeutschen Referenzregionen werden statistische Daten für die anliegenden Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern für Süddeutschland bzw. Niedersachsen und Sachsen-Anhalt für Norddeutschland verwendet (Statistisches-Bundesamt, 2010). Die entsprechenden Daten für landwirtschaftliche- und Waldflächen sind in **Tabelle 3** zusammengefasst.

Tabelle 3: Anteile der landwirtschaftlichen und Waldfläche an der Gesamtfläche in den deutschen Referenzregionen (Statistisches-Bundesamt, 2010).

Referenzregion	Bundesland	Landwirtschaftsfläche [%]			Waldfläche [%]
		Zusammen	Moore	Heide	
Süd-deutschland	Baden-Württemberg	45.9	0.1	0	38.3
	Bayern	49.6	0.3	0.1	35.0
Nord-deutschland	Niedersachsen	60.4	1.2	0.2	21.5
	Sachsen-Anhalt	62.1	0	0.8	24.1

Der größte Teil der landwirtschaftlich genutzten Fläche setzt sich aus Ackerland, Dauergrünland, Obstanlagen und Gartenland zusammen (Statistisches-Bundesamt, 2010). Sonstige Anbauflächen wie Rebland, Baumschulen und Weihnachtsbaumkulturen machen nur einen kleinen Prozentsatz der Gesamtfläche aus und sind für die Modellierung nicht relevant (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Anteil von Ackerland, Dauergrünland, Obstanlagen und Gartenland an der landwirtschaftlichen Gesamtflächen (Statistisches-Bundesamt, 2010).

Bundesland	Anteil an landwirtschaftlicher Gesamtfläche [%]				
	Ackerland	Obstanlagen	Dauergrünland	Gartenland	Sonstige
Baden-Württemberg	58.5	1.5	38.1	0.05	2.0
Bayern	65.2	0.2	34.4	0.00	0.3
Niedersachsen	72.3	0.4	27.0	0.02	0.3
Sachsen-Anhalt	85.5	0.2	14.2	0.00	0.1

Der Anteil an Gartenland von Privatpersonen an der Gesamtfläche ist nach diesen Daten relativ gering und deutet auf einen niedrigen Selbstversorgungsgrad hin. Diese Daten bilden jedoch die jetzige Situation in Deutschland ab und nicht die Landverteilung von einer selbstversorgenden kleinen Gemeinschaft.

In der südlichen Referenzregion werden lediglich 50% der Gesamtfläche zur Landwirtschaft verwendet. Etwa ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche wird dabei als Dauergrünland zur Futtermittelgewinnung für die Viehzucht verwendet und in dem Modell als Weide zur Grasproduktion angesehen. In den nördlichen Referenzregionen wird auf bis zu 60% der Gesamtfläche Landwirtschaft betrieben. Hier ist der Anteil der Ackerflächen größer und lediglich ein Viertel der landwirtschaftlich genutzten Fläche wird zur

Grasproduktion verwendet. Dieser Unterschied in der landwirtschaftlichen Nutzung lässt sich wohl auf die etwas flachere Landschaft in den nördlichen Referenzregionen zurückführen, die besser für Ackerbau geeignet ist als die Landschaft in der südlichen Referenzregion.

3.2: Charakterisierung möglicher zukünftiger Zustände

3.2.1: Analyse von BIOCLIM

Da der Einlagerungszeitraum von hochradioaktiven Abfällen mit 1.000.000 Jahren vorgegeben ist (BfS, 2005), müssen Änderungen des Klimas in diesem Zeitraum in Betracht gezogen werden. Um die Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen nach der BIOMASS Methodologie unter Berücksichtigung der klimatischen Entwicklungen in Europa zu unterstützen, wurde das BIOCLIM Projekt durchgeführt (BIOCLIM, 2004). Zur Vorhersage der Klimaentwicklung der nächsten 200.000 bis 1.000.000 Jahre wurden verschiedene Modelle entwickelt, die paläoklimatische Daten, Sonneneinstrahlung, Milankovic Zyklen und verschiedene mögliche CO₂ Konzentrationen der Atmosphäre berücksichtigen. Anschließend wurden für verschiedene Regionen in Europa unter anderem Vorhersagen zur glazialen Überdeckung und der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung erstellt.

Anhand der BIOCLIM Vorhersagen für den norddeutschen Raum können nun Referenzklimaregionen für die Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen ausgewählt werden. Dabei werden verschiedene Szenarien berücksichtigt. Das erste „natürliche“ Szenario A4 geht von einem CO₂ Gehalt der Luft von 290 ppmv während der nächsten 50.000 Jahren mit einem anschließenden Abfall auf 190 ppmv bei 100.000 Jahren und einem Anstieg auf 276 ppmv nach 122.000 Jahren aus. Bei dem Szenario B3 wird von erhöhten CO₂ Konzentrationen der Luft während des Simulationszeitraumes ausgegangen. Hier gibt es zwei Unterszenarien B3a mit einer starken Erhöhung auf 1100 ppmv und B3b mit einer leichten Erhöhung auf 550 ppmv. Die von A4 und B3b für Norddeutschland vorhergesagten Klimazustände sind in **Abbildung 6** zusammengefasst. Laut BIOCLIM kommt es in dieser Zeit für keines der betrachteten Szenarien zu einer glazialen Überdeckung in diesem Gebiet.

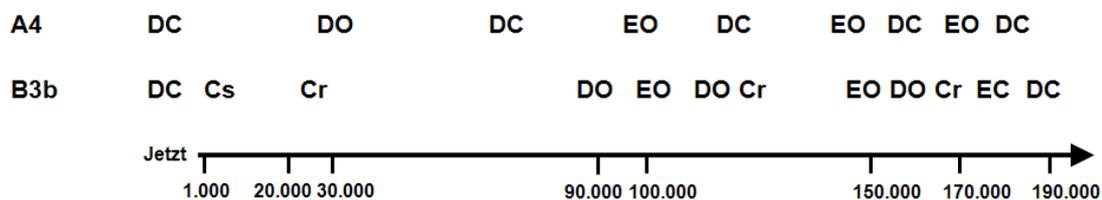
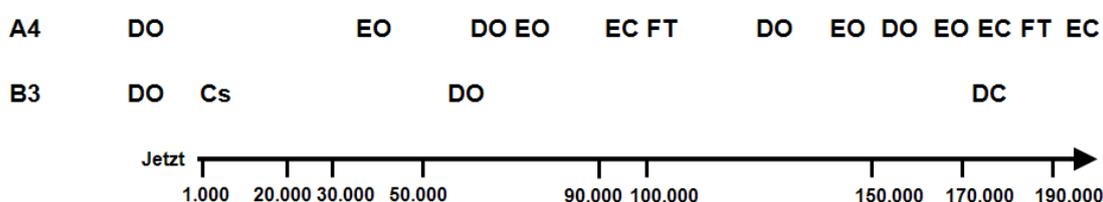


Abbildung 6: Zeitstrahl zur Veränderung des Klimas in den nächsten 200.000 Jahren nach den Szenarien A4, natürliche CO₂ Konzentration der Atmosphäre, und B3b, erhöhte CO₂ Konzentration der Atmosphäre, des BIOCLIM Projektes in Norddeutschland (BIOCLIM, 2004). Im Modell B3b oszilliert das Klima zwischen 100.000 und 170.000 Jahren zwischen DO und Cr mit einer kurzen Abkühlung auf EO bei 145.000 Jahren. Zur Ausbildung eines Permafrostes und Tundra Klimas kommt es nur in extremen Sonderfällen.

Süddeutsche Standorte wurden in der BIOCLIM Analyse nicht betrachtet. Als nahe liegende Ersatzstandorte betrachten wir die französische Region Haute-Marne und Südschechien (**Abbildung 7**). In diesen Standorten herrschen vergleichbare klimatische Bedingungen wie in Süddeutschland.

In dem südschechischen Standort kommt es laut BIOCLIM in den nächsten 200.000 Jahren nicht zur glazialen Überdeckung. Historisch gesehen lagen während den Riß- und Würmzeiten die Eisgrenzen in Deutschland südlich des Ulmer Donaugebietes (Förster et al., 2010). Aus diesen beiden Gründen wird für die nächsten 200.000 Jahre für das Donaugebiet um Ulm keine glaziale Überdeckung erwartet. Trotzdem kann eine mögliche glaziale Überdeckung für den gesamten Zeitraum von 1.000.000 Jahren nicht ausgeschlossen werden.

Frankreich: Haute-Marne



Südschechien

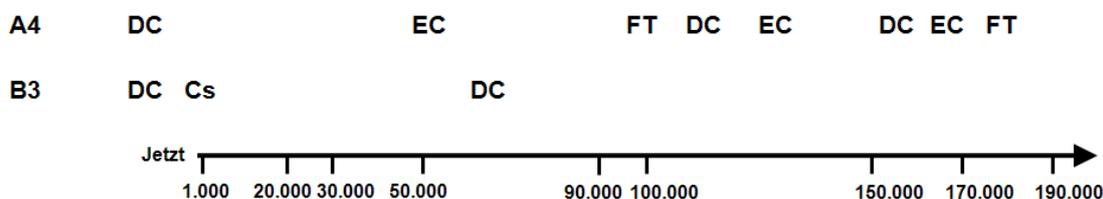


Abbildung 7: Zeitstrahl zur Veränderung des Klimas in den nächsten 200.000 Jahren nach den Szenarien A4, natürliche CO₂ Konzentration der Atmosphäre, und B3, erhöhte CO₂ Konzentration der Atmosphäre, des BIOCLIM Projektes in der französischen Haute-Marne Region und Südschechien (BIOCLIM, 2004).

Der Hauptunterschied der französischen und tschechischen Regionen besteht darin, dass die Haute-Marne Region durch maritimes Klima DO und die südschechische Region von kontinentalem Klima DC geprägt ist. Da die süddeutsche Referenzklimaregion Ulm nach der Trewartha Klassifizierung ebenfalls kontinentales Klima DC aufweist, werden zur Definition zukünftiger Klimazustände die südschechischen Szenarien verwendet.

Im BIOCLIM Projekt wurde die Klimaklassifikation von Trewartha verwendet. Eine Tabelle zur Umwandlung der Klimaregionen nach Trewartha zu den in diesem Bericht verwendeten Klimaregionen nach Köppen/Geiger und den entsprechenden Referenzklimastationen ist in **Tabelle 5** aufgezeigt.

Tabelle 5: Umwandlung der Klimaregion nach Trewartha in BIOCLIM zu Köppen/Geiger Entsprechungen und Beispielklimastationen. Viele der von uns verwendeten Referenzklimastationen wurden im BIOCLIM Projekt nicht betrachtet. Diese sind mit * in der „Trewartha“ Spalte markiert.

Trewartha	Köppen/Geiger	Klimastation
BS*	BS	Marrakesch
Cs	Csa	Rom
Cs*	Dfa	Rostow
Cs*	Csb	Valladolid
Cr*	Cfb	Santander
DC*	Cfb	Magdeburg
DC*	Cfb	Ulm
DO*	Cfb	Hannover
EO	Dfb	Turku
EC	Dfc	Sodankylä
FT*	ET	Vardo

3.2.2: Zuordnung von Klimastationen

Da sich der Zeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis über bis zu 1.000.000 Jahre erstreckt, ist für die Vorhersage von Änderungen des Klimas in diesem Zeitraum eine rückwirkende Betrachtung angemessen. Aus dieser Betrachtung kann die Schwankungsbreite der künftigen Entwicklung abgeleitet werden. Die Jahresmitteltemperatur schwankte in dieser Zeit etwa um 10-15°C (BIOCLIM, 2004; Petit et al., 1999). Die Referenzstationen zum Klimawandel wurden so ausgewählt, dass sie eine ähnliche Schwankungsbreite in der Jahresmitteltemperatur aufzeigen und zusätzlich sowohl feuchtere als auch trockenere Bedingungen wie die deutschen Referenzstationen aufweisen. Außerdem sollen sie mögliche Entwicklungen des Klimas an den deutschen Referenzregionen nach BIOCLIM abbilden.

Die neun Klimaregionen werden in eine 3x3 Matrix eingeordnet, mit den deutschen Klimaregionen Elbe, Weser/Aller und Donau in der Mitte. Für die Modellierung ist es zweckmäßig, die neun Referenzklimastationen in warme subtropische, kalte boreale und gemäßigte Klimazonen aufzuteilen. Von dem derzeitigen Zustand kann sich das Klima innerhalb der Matrix in alle Richtungen, was Temperatur und Luftfeuchtigkeit angeht, ändern (**Abbildung 8**). So werden alle realistisch möglichen zukünftigen Klimazustände zusammen mit den Extremsituationen Steppe und Tundra abgedeckt. Mögliche zeitliche Abfolgen von verschiedenen Klimazuständen nach den Szenarien B3 und A4 des BIOCLIM Projektes sind in **Abbildung 6, 7 und 12** dargestellt.

Turku ist eine boreale Referenzklimastation an der Ostseeküste Finnlands. Trotz der Küstennähe wird diese Station in der Köppen/Geiger Klassifikation als *Dfb*, warme Sommer, kalte Winter kontinentales Klima eingestuft. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 4,8°C, der Niederschlag 576 mm (Müller, 1996). In unserem Modell ist Turku ein Beispiel für einen Klimawandel zu kälteren und feuchteren Bedingungen. In der Landwirtschaft wird das Wasserdefizit während

der Wachstumsmonate der landwirtschaftlich genutzten Pflanzen rechnerisch jährlich mit durchschnittlich 92 l/m² Bewässerung ausgeglichen. Dies ist eine konservative Annahme, da in diesem Gebiet lediglich bis zu 1% der Fläche bewässert wird (Siebert et al., 2007).

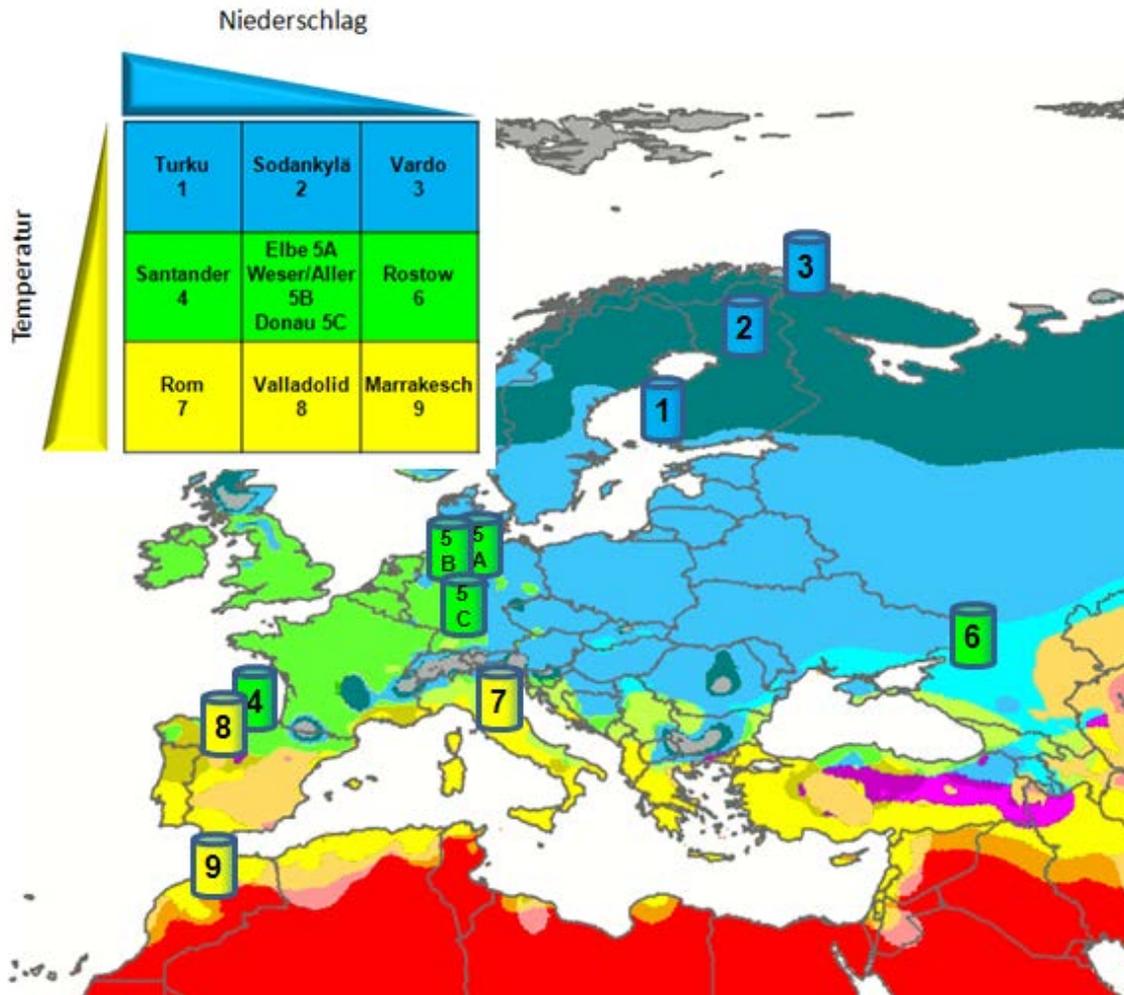


Abbildung 8: Auswahl der neun Klimareferenzstationen anhand der Köppen/Geiger Klimaklassifikation (Peel et al., 2007). In Blau sind die borealen, in Grün die gemäßigten und in Gelb die subtropischen Referenzklimastationen aufgeführt.

Sodankylä ist eine Stadt in Zentralfinnland, die unter die Klassifikation *Dfc*, kontinentales, boreales subarktisches Klima mit kalten Wintern fällt. Die Jahresmitteltemperatur beträgt -0,4°C, der Niederschlag 508 mm (Müller, 1996). In unserem Modell ist Sodankylä die Klimareferenzstation für eine Entwicklung zu kälterem Klima. Die Bewässerungsmenge pro Jahr würde 28 l/m² betragen. Diese Annahme einer Bewässerung ist ähnlich konservativ wie in der Referenzklimaregion Turku, da ebenfalls nur wenige landwirtschaftliche Flächen bewässert werden (Siebert et al., 2007).

Vardo ist eine Stadt auf einer der Nordküste Norwegens vorgelagerten Insel. Vardo ist eine der wenigen Städte in Europa, die in der Köppen/Geiger ET Tundra Klimazone liegt. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 1,6°C, der

Niederschlag 544 mm (Müller, 1996). Vardo ist in unserem Referenzmodell die Referenzklimastation für eine Entwicklung zu kälterem und trockenerem Klima unter Permafrost Bedingungen. Da in Vardo aufgrund der niedrigen Temperaturen rechnerisch kein Wasserdefizit vorliegt und auch kein Ackerbau betrieben werden kann, muss auch nicht bewässert werden. Die Definition einer selbstversorgenden Gemeinschaft für die Tundra ist schwierig, da Ackerbau hier kaum möglich ist. Größere Bevölkerungsgruppen lassen sich lediglich durch den Import von Nahrungsmitteln aufrechterhalten. Kleinere Jäger und Sammler Gemeinschaften sind fähig zur Selbstversorgung. Beispiele hierfür sind die Inuit in Nordamerika und die Sami in Nordeuropa. Hauptbestandteil der Nahrung sind hier Proteine und Fette aus erbeuteten Tieren, ergänzt durch gesammelte Beeren und Pilze. Weitere Nahrungsquellen sind Milch aus beschränkter Viehzucht sowie Fleisch aus der Schafzucht. Eine marine Ernährungsweise wird nicht betrachtet. Da in der Tundra auch ein Ansteigen des Grundwassers aufgrund des Permafrostes nicht möglich ist, ist der Quellterm nicht Grundwasser, sondern Oberflächenwasser. Die Konzentration der Radionuklide wird im Oberflächenwasser ebenfalls mit 1 Bq/l angenommen.

Santander liegt im Norden Spaniens an der Atlantikküste. Nach der Köppen/Geiger Klassifikation liegt Santander in der gemäßigten *Cfb* Klimazone. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 13,9°C, der Niederschlag 1198 mm (Müller, 1996). Santander dient als Referenzklimastation für eine Entwicklung zu feuchteren Klimabedingungen. Aufgrund des hohen Niederschlags muss lediglich mit 101 l/m² jährlich bewässert werden.

Die Referenzklimastationen Magdeburg, Hannover und Ulm stellen die derzeitige Spannbreite der gemäßigten Klimabedingungen in Deutschland dar. Die drei Klimastationen liegen mit Jahresniederschlagswerten von 513, 661 und 754 mm und Durchschnittstemperaturen von 9,2, 8,7 und 7,5°C in der *Cfb* Klimazone, wobei in Magdeburg und Ulm kontinentaleres Klima als in Hannover vorherrscht (Müller, 1996). Magdeburg ist eine relativ trockene Klimastation, Hannover eine Klimastation mit mittleren und Ulm eine Klimastation mit hohen Niederschlagswerten. Entsprechend liegen rechnerisch die jährlichen Werte für die Bewässerung bei 223 l/m² für Magdeburg, 88 l/m² für Hannover und 11 l/m² für Ulm. In der Region um Magdeburg werden bis zu 75% der landwirtschaftlichen Flächen bewässert, in Hannover und Ulm maximal 1-5% der Flächen (Siebert et al., 2007).

Rostow ist eine Stadt in der Russischen Föderation in der Nähe des Asowschen Meeres. Klassifiziert ist Rostow als *Dfa* Klima mit heißen kontinentalen Sommern. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,4°C, die Niederschlagsmenge 483 mm (Müller, 1996). Trotz der relativ kalten Winter ist Rostow aufgrund der heißen Sommer die Referenzklimastation für eine Änderung des Klimas zu trockeneren Bedingungen, da während der warmen trockenen Sommer Landwirtschaft betrieben wird. Um das Wasserdefizit während der Wachstumsperiode auszugleichen, muss mit 457 l/m² bewässert werden.

Valladolid ist eine Stadt in Zentralspanien und dient als Referenzklimastation für ein subtropisches *Csb* Köppen/Geiger Klima. Mit einer Jahresmitteltemperatur von 12,1°C und einem Niederschlag von 364 mm (Müller, 1996) hat Valladolid ein trockenes Klima mit warmen Sommern und dient als Referenzklimastation für eine Veränderung zu wärmerem Klima. Aufgrund des trockenen Klimas benötigt die Landwirtschaft im Schnitt 576 l/m² Jahr Bewässerung.

Rom hat nach der Köppen/Geiger Klassifikation *Csa* ein subtropisches mediterranes Klima mit warmen Sommern mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 15,6°C. Aufgrund starker winterlicher Niederschläge beträgt die Niederschlagsmenge 874 mm (Müller, 1996). Aus diesem Grund ist Rom die Referenzklimastation für eine Entwicklung zu wärmerem und feuchterem Klima. Da der größte Teil des Niederschlags im Winter fällt und die Pflanzen relativ lange Vegetationsperioden haben, muss mit 599 l/m² pro Jahr relativ stark bewässert werden.

Marrakesch ist die einzige Referenzklimastation außerhalb Europas und liegt im Zentrum Marokkos. Marrakesch ist als Steppenklimate *BS* eingestuft und liegt in der subtropischen Klimazone. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 19,9°C, der Niederschlag 241 mm (Müller, 1996). Marrakesch ist somit ein Beispiel für eine Entwicklung zu wärmerem und trockenerem Klima. Aufgrund der heißen Sommer wird angenommen, dass ein gewisser Teil der landwirtschaftlichen Aktivität in den milderen Wintermonaten stattfindet. Da dann zumindest etwas Niederschlag fällt, wird während der Wachstumsmonate etwa mit 522 l/m² und Jahr bewässert.

Da die Klimastationen Valladolid, Rom und Marrakesch laut der Köppen Geiger Klassifikation in den Subtropen liegen, können einige Parameter, wie Transferfaktoren von Radionukliden vom Boden in Nutzpflanzen, gegenüber den gemäßigten Breiten angepasst werden. Entsprechend werden die Transferfaktoren Boden zu Pflanze für die borealen Klimaregionen Turku, Sodankylä und Vardo, soweit bekannt, ebenfalls angepasst.

Intuitiv betrachtet müsste man die Klimastationen Rom und Marrakesch in der Klimamatrix vertauschen, da in Rom im Sommer Landwirtschaft betrieben wird, während der Großteil des Regens im Winter fällt, wodurch dort die höchsten Bewässerungsmengen aller Referenzklimastationen erreicht werden. In Marrakesch wird die Landwirtschaft im kühleren und feuchteren Winter betrieben, weswegen geringere Bewässerungsmengen nötig sind.

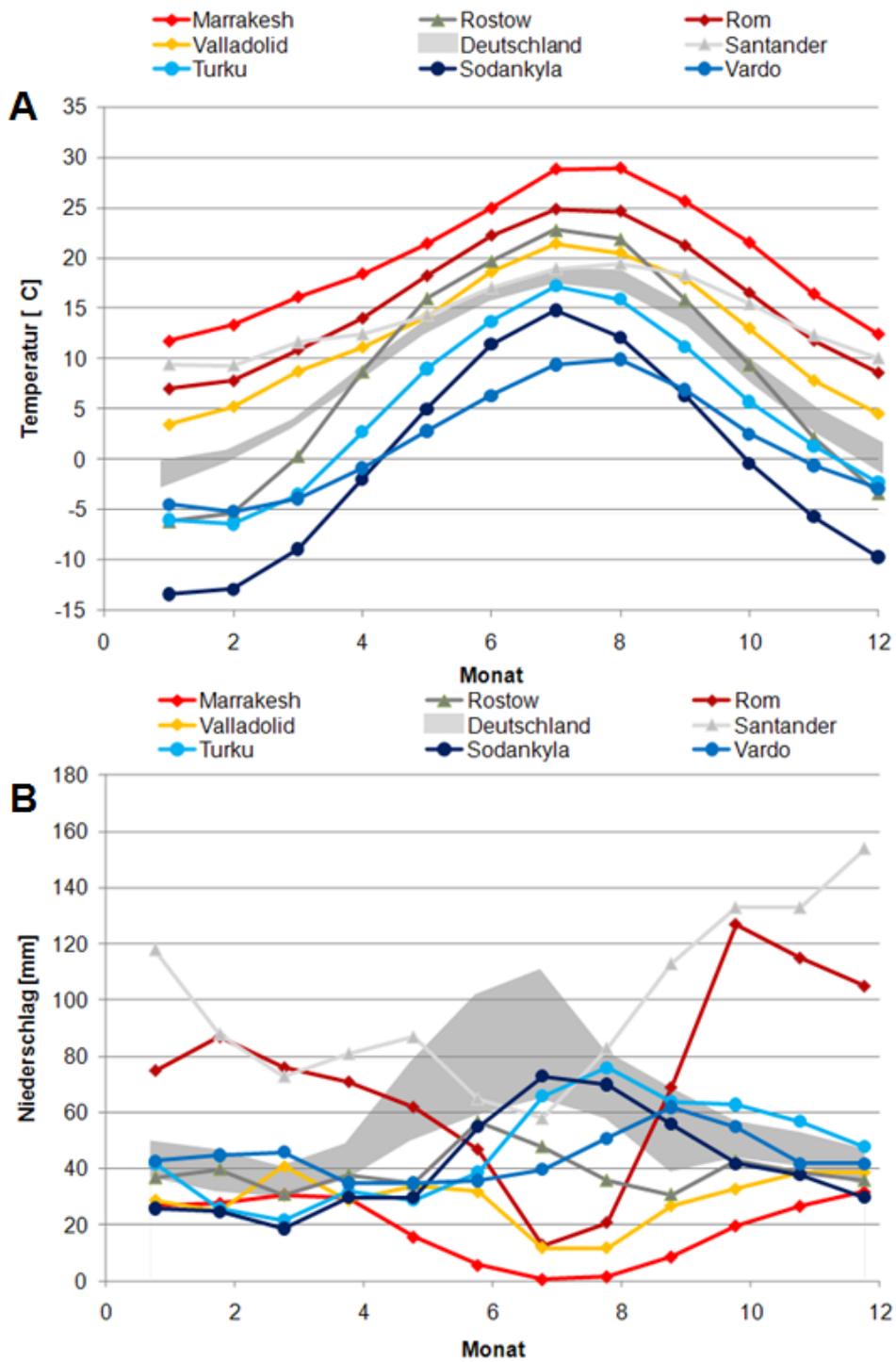


Abbildung 9: A) Mittlere monatliche Temperatur und B) mittlerer monatlicher Niederschlag an den Klimareferenzstationen (Müller, 1996). Für Deutschland ist die Bandbreite der drei Klimaregionen Elbe, Weser/Aller und Donau als graue Fläche aufgeführt.

Tabelle 6: Klimadaten zu den Referenzklimastationen für den Klimawandel (Müller, 1996). Monatsdaten für die deutschen Klimastationen sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Warm	Marrakesch	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Temperatur [°C]	11,6	13,2	16,0	18,3	21,3	24,8	28,7	28,8	25,5	21,4	16,3	12,3	19,9
	Niederschlag [mm]	28,0	29,0	32,0	31,0	17,0	7,0	2,0	3,0	10,0	21,0	28,0	33,0	241,0
	Luftfeuchtigkeit [%]	77,0	73,0	70,0	65,0	60,0	58,0	53,0	53,0	57,0	61,0	65,0	66,0	63,0
	Wasser Defizit [mm]	25	40	63	90	140	192	252	252	198	136	75	38	
	Rom	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Temperatur [°C]	6,9	7,7	10,8	13,9	18,1	22,1	24,7	24,5	21,1	16,4	11,7	8,5	15,6
	Niederschlag [mm]	76,0	88,0	77,0	72,0	63,0	48,0	14,0	22,0	70,0	128,0	116,0	106,0	874,0
	Luftfeuchtigkeit [%]	77,0	73,0	71,0	70,0	67,0	62,0	58,0	59,0	66,0	72,0	77,0	79,0	69,0
	Wasser Defizit [mm]	-49	-52	-21	6	54	115	183	172	78	-31	-61	-73	
	Rostow	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Temperatur [°C]	-6,3	-5,5	0,2	8,6	15,9	19,6	22,7	21,8	15,8	9,3	2,0	-3,5	8,4
Niederschlag [mm]	38,0	41,0	32,0	39,0	36,0	58,0	49,0	37,0	32,0	44,0	40,0	37,0	483,0	
Luftfeuchtigkeit [%]	87,0	85,0	80,0	67,0	59,0	61,0	58,0	58,0	62,0	75,0	82,0	87,0	72,0	
Wasser Defizit [mm]	-51	-52	-31	8	71	80	125	128	71	-2	-37	-50		
Gemäßigigt	Valladolid	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Temperatur [°C]	3,3	5,1	8,6	11,0	14,1	18,5	21,3	20,4	17,8	12,9	7,7	4,4	12,1
	Niederschlag [mm]	30,0	26,0	42,0	30,0	35,0	33,0	13,0	13,0	28,0	34,0	40,0	40,0	364,0
	Luftfeuchtigkeit [%]	84,0	78,0	69,0	64,0	62,0	57,0	51,0	55,0	63,0	71,0	80,0	85,0	68,0
	Wasser Defizit [mm]	-26	-8	3	35	54	100	155	141	91	35	-12	-33	
	Jahresdurchschnitt	Magdeburg (Elbe)			Hannover (Weser/Aller)				Ulm (Donau)					
	Temperatur [°C]	9,2			8,7				7,5					
	Niederschlag [mm]	513,0			661,0				754					
	Luftfeuchtigkeit [%]	76,0			90				79					
	Santander	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur [°C]	9,3	9,2	11,5	12,3	14,2	16,9	18,8	19,3	18,2	15,3	12,2	9,9	13,9	
Niederschlag [mm]	119,0	89,0	74,0	82,0	88,0	66,0	59,0	84,0	114	134,0	134,0	155,0	1198	
Luftfeuchtigkeit [%]	75,0	76,0	74,0	77,0	80,0	81,0	80,0	81,0	80,0	78,0	76,0	76,0	78,0	
Wasser Defizit [mm]	-77	-48	-17	-23	-19	23	49	27	-11	-54	-75	-110		
Kalt	Turku	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Temperatur [°C]	-6,1	-6,5	-3,6	2,6	8,9	13,6	17,1	15,8	11,1	5,6	1,2	-2,4	4,8
	Niederschlag [mm]	43,0	27,0	23,0	33,0	30,0	40,0	67,0	77,0	65,0	64,0	58,0	49,0	576,0
	Luftfeuchtigkeit [%]	87,0	84,0	79,0	74,0	64,0	66,0	69,0	74,0	79,0	84,0	88,0	89,0	78,0
	Wasser Defizit [mm]	-56	-36	-26	-19	22	41	38	11	-17	-51	-64	-63	
	Sodankylä	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	Temperatur [°C]	-13,5	-13	-9,0	-2,1	4,9	11,3	14,7	12,0	6,2	-0,5	-5,8	-9,8	-0,4
	Niederschlag [mm]	27,0	26,0	20,0	31,0	31,0	56,0	74,0	71,0	57,0	43,0	39,0	31,0	508,0
	Luftfeuchtigkeit [%]	87,0	85,0	78,0	71,0	61,0	60,0	65,0	74,0	81,0	87,0	91,0	89,0	77,0
	Wasser Defizit [mm]	-26	-24	-19	-23	6	16	16	-11	-38	-52	-57	-42	
Vardo	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	
Temperatur [°C]	-4,6	-5,3	-4,0	-1,0	2,7	6,2	9,3	9,8	6,8	2,4	-0,7	-3,0	1,6	
Niederschlag [mm]	44,0	46,0	47,0	36,0	36,0	37,0	41,0	52,0	63,0	56,0	43,0	43,0	544,0	
Luftfeuchtigkeit [%]	86,0	87,0	86,0	83,0	80,0	83,0	86,0	85,0	84,0	84,0	85,0	86,0	85,0	
Wasser Defizit [mm]	-56	-59	-59	-41	-29	-20	-12	-19	-45	-54	-50	-54		

Die Einteilung in die Klimamatrix wird allerdings rein über die jährlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschläge, und nicht aufgrund der errechneten Bewässerungsmengen durchgeführt. Ähnlich verhält es sich auch mit den drei nördlichen Klimastationen, Turku, Vardo und Sodankylä. Die 30-Jahres-Mittelwerte der Klimadaten von 1961 bis 1991 sind in **Abbildung 9** und **Tabelle 6** zusammengefasst (Müller, 1996).

3.2.3: Ableitung möglicher zukünftiger Klimazustände für Nord- und Süddeutschland

Wendet man die BIOCLIM Ergebnisse auf die Klimadaten von derzeitigen Referenzklimastationen an, erhält man Klimadaten, mit deren Hilfe man Referenzklimastationen für zukünftige Entwicklungen auswählen kann. Verwendet man zum Beispiel bei erhöhtem CO₂-Gehalt der Atmosphäre eine Erwärmung von 3°C im Winter und 5°C im Sommer sowie eine Erhöhung des Niederschlages von 30 mm pro Monat im Winter und eine Erniedrigung des Niederschlages von 9 mm bis 51 mm im Sommer für die nächsten Jahrhunderte (BIOCLIM, 2004; IPCC, 2007), so kann man diese mit den Klimadaten der Referenzklimastation Hannover verrechnen. Dabei erhält man Klimadaten, die denen der Referenzklimaregion Rom ähneln. Die für die Landwirtschaft relevanten Sommertemperaturen stimmen gut miteinander überein. Die Niederschlagswerte sind im Jahresverlauf etwas verschoben, zeigen aber eine Umkehr der jetzigen feuchten Sommer/trockene Winter Zustände in Hannover zu trockenen Sommer/feuchte Winter in Rom. Die Referenzklimastation Magdeburg entwickelt sich nach Einbeziehung dieser BIOCLIM Vorhersagen für die nächsten Jahrhunderte ebenfalls in Richtung trockener Sommer bei subtropischem Klima (**Abbildung 10**).

Aufgrund des hohen sommerlichen Niederschlages der Referenzklimastation Ulm kommt es, nach Einbezug der BIOCLIM Ergebnisse für die nächsten Jahrhunderte bei erhöhtem CO₂ Gehalt der Atmosphäre, im Gegensatz zu den norddeutschen Klimareferenzstationen nur zu einem schwach ausgeprägten Wechsel der Niederschlagsmengen zwischen Sommer und Winter. Als Referenzklimastationen können neben Rom die Referenzklimastation Valladolid oder Rostow verwendet werden. Die Niederschläge sind für Valladolid zwar etwas niedriger als die berechneten Werte für Ulm/BIOCLIM, trotzdem kann diese Referenzklimastation als „trockener“ Grenzfall angenommen werden. Bei Rostow sind die Niederschlagswerte im Sommer gut mit Ulm vergleichbar, die Wintertemperaturen sind allerdings aufgrund des stark kontinentalen Klimas in Rostow niedriger (**Abbildung 11**). Zusammenfassend grenzen die drei Referenzklimastationen Rom, Rostow und Valladolid die möglichen Entwicklungen der süddeutschen Referenzregion Ulm zu verschiedenen Ausprägungen eines wärmeren Klimas ein.

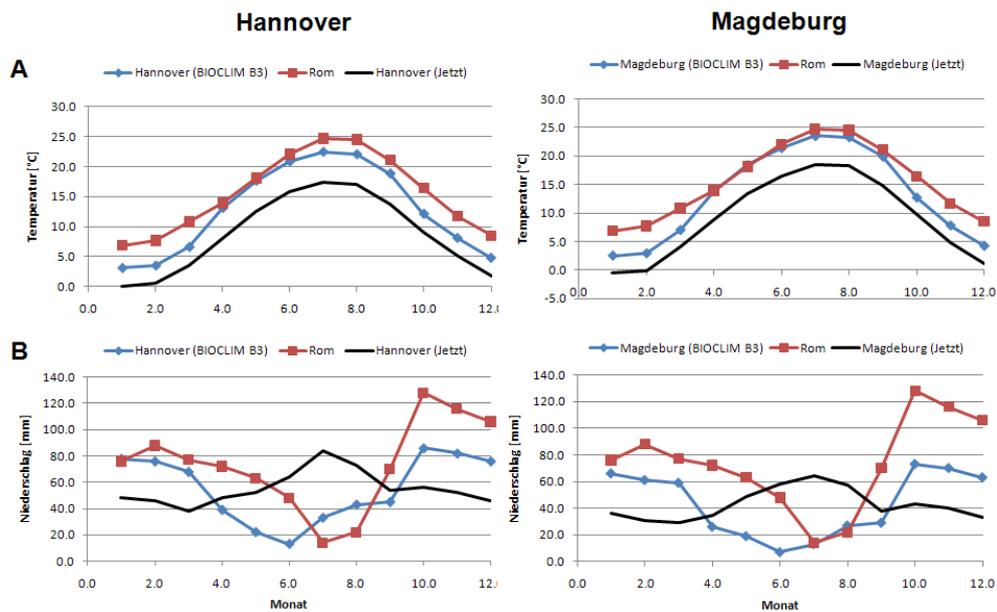


Abbildung 10: Verrechnung von BIOCLIM Ergebnissen für die nächsten Jahrhunderte mit Daten der Klimastationen Hannover und Magdeburg bei erhöhtem CO₂ Gehalt der Atmosphäre. Die resultierenden Daten sind vergleichbar mit den Daten der Referenzklimastation Rom. Es wird in A) Temperatur, in B) Niederschlag aufgezeigt.

Ulm

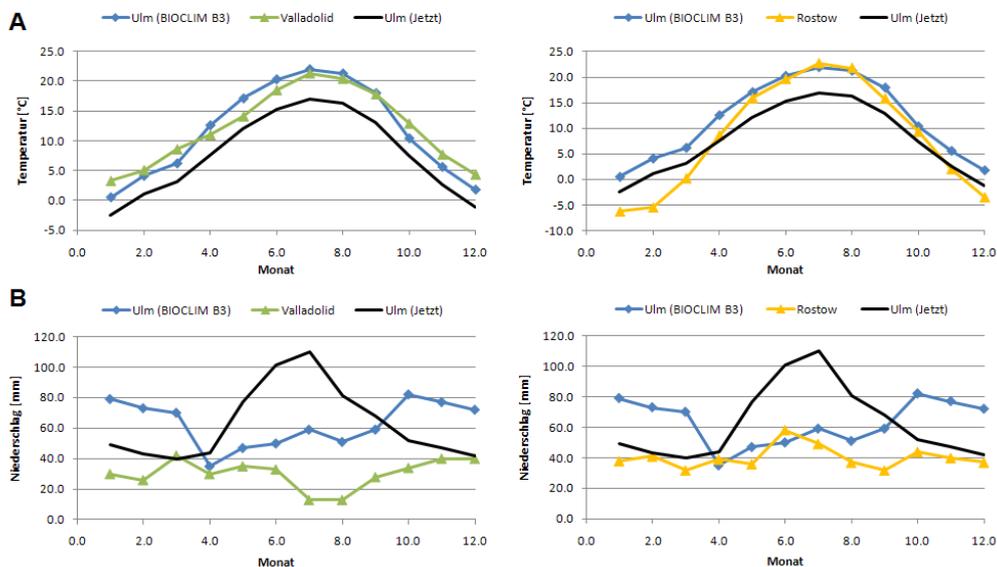


Abbildung 11: Verrechnung von BIOCLIM Ergebnissen für die nächsten Jahrhunderte mit Daten der Klimastationen Ulm bei erhöhtem CO₂ Gehalt der Atmosphäre. Die resultierenden Daten sind vergleichbar mit den Daten der Referenzklimastation Rostow und Valladolid. Es wird in A) Temperatur, in B) Niederschlag aufgezeigt.

Wenn man nun die Ergebnisse von BIOCLIM (BIOCLIM, 2004) mit den ausgewählten möglichen Referenzklimaregionen kombiniert, erhält man Zeitreihen für die Abfolge von Referenzklimaregionen an den Referenzregionen in Nord- und Süddeutschland für die nächsten 200.000 Jahre (**Abbildung 12**).

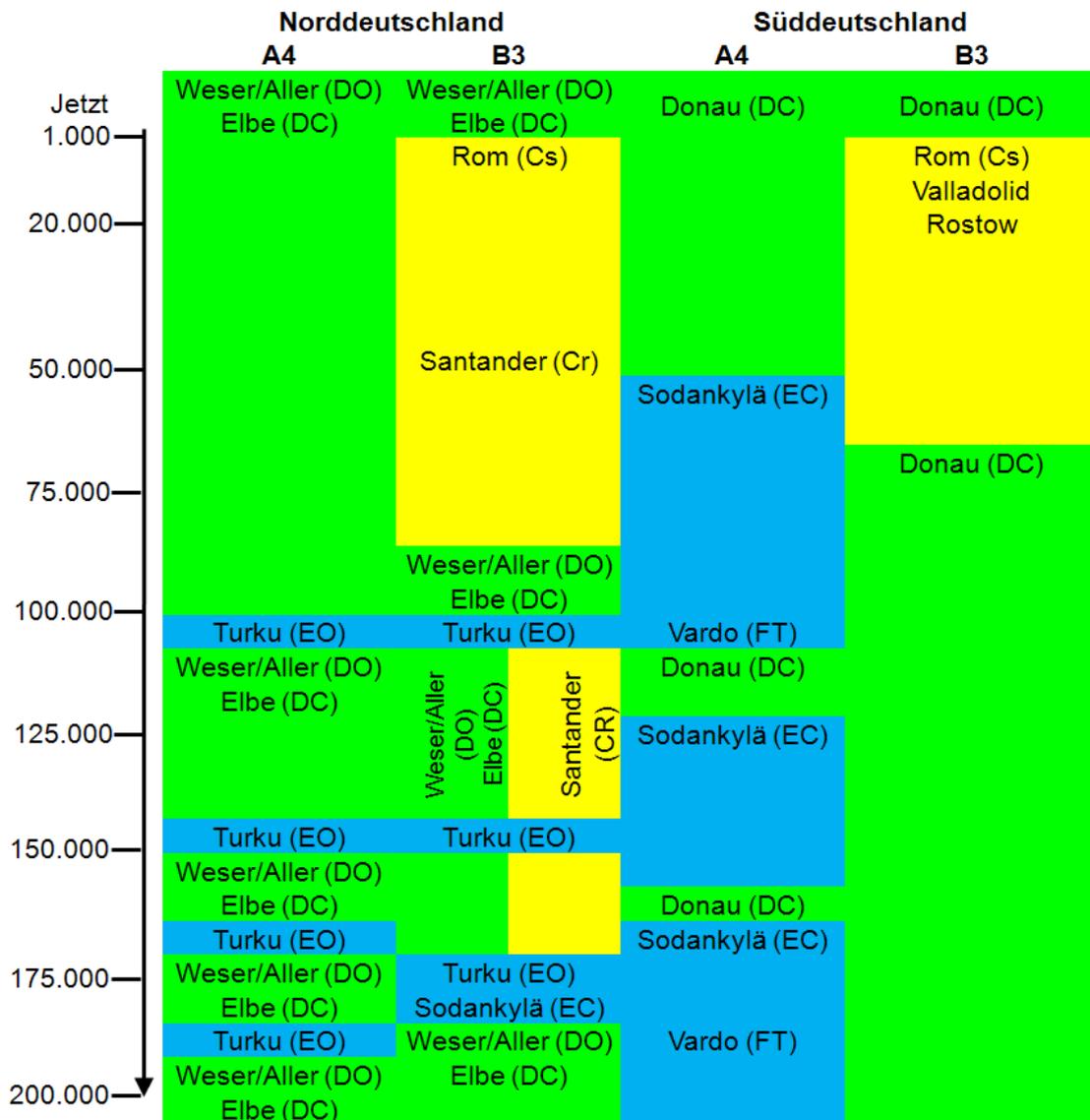


Abbildung 12: Zeitliche Abfolge künftiger Klimazustände nach BIOCLIM und dazugehöriger Referenzklimastationen für nord- und süddeutsche Standorte. Szenario A4 nimmt einen natürlichen und Szenario B3 einen erhöhten CO₂ Gehalt der Atmosphäre an.

Die Referenzklimaregion Marrakesch kommt in dieser Zeitreihe nicht vor. Nach den BIOCLIM Vorhersagen wird es in Deutschland für die nächsten 200.000 Jahre zwar nicht zu einem Steppenklima wie in Marrakesch kommen, allerdings kann dieser Klimazustand für die nächsten 10⁶ Jahre nicht ausgeschlossen werden. Das Gleiche gilt für eine mögliche glaziale Überdeckung der deutschen Referenzklimaregionen.

Bei der Begutachtung der BIOCLIM Daten und besprochenen Vorhersagen für die nächsten 200.000 Jahre muss jedoch beachtet werden, dass Radionuklide eine gewisse Zeit benötigen um aus dem Endlager in die Biosphäre gelangen. Diese Zeit ist bedingt durch die Lebensdauer der Verpackung der Radionuklide im Endlager und der Migrationsgeschwindigkeit der einzelnen Radionuklide in der Geosphäre. Je nach Radionuklid kann es mehrere zehn bis hundert

tausend Jahre dauern, bis es zu einem Eintritt in oberflächennahes Grundwasser und somit zur Kontamination der Biosphäre kommt (EPRI, 2009; SKB, 2011). Es ist daher möglich, dass die Radionuklide erst in der Biosphäre ankommen, wenn die Vorhersagen für die meisten BIOCLIM Modelle bereits abgelaufen sind. Aus diesem Grund werden in diesem Projekt alle realistisch möglichen Klimaveränderungen, von Permafrost Tundra Bedingungen bis hin zu Steppenklimate abgedeckt.

3.2.4: Einfluss des Klimawandels auf die Landnutzung

Es wird angenommen, dass es zu Änderungen des Klimas während des Zeitraumes des Sicherheitsnachweises kommen wird. Diese Klimaänderungen führen unter anderem zu einer Änderung der Landnutzung in der Landwirtschaft.

Prinzipiell kann man von folgenden vier grundlegenden Szenarien bei einer Änderung des Klimas ausgehen:

- Erwärmung des Klimas von gemäßigtem zu wärmerem Klima.
- Erwärmung des kälteren zu gemäßigtem Klima.
- Abkühlung des wärmeren zu gemäßigtem Klima.
- Abkühlung des gemäßigten zu kälterem Klima.

Laut den BIOCLIM Vorhersagen sind all diese Szenarien für die nächsten 200.000 Jahre möglich (BIOCLIM, 2004). Dabei wird vor allem die Änderung der Temperatur berücksichtigt. Veränderte Niederschlagsmengen werden in diesem Kapitel diskutiert.

Die Entwicklung von neuen Pflanzensorten oder landwirtschaftlicher Verfahren können für derartig lange Zeiträume nicht vorhergesagt werden. Es wird vorausgesetzt, dass sich die zukünftigen landwirtschaftlichen Praktiken und Nutzpflanzen nicht grundsätzlich von denen unterscheiden, die heute in den entsprechenden Referenzklimaregionen vorherrschen und verwendet werden. Es kommt in unserem Modell also zu keiner im System inhärenten Steigerung der Produktivität durch neue Techniken, wie sie in vielen Voraussagen zur Klimaveränderung im 21. Jahrhundert angenommen wird (Ciscar et al., 2011; Falloon und Betts, 2010; IPCC, 2007). Andererseits wird aber auch kein Verlust der heute bekannten landwirtschaftlichen Methoden angenommen. Gesellschaftliche Umbrüche und Verwerfungen durch die Klimaänderung werden nicht betrachtet.

Obwohl die meisten Vorhersagen für die Auswirkungen eines Klimawandels auf das nächste Jahrhundert beschränkt sind, liefern sie wertvolle Hinweise für die Entwicklung der Landwirtschaft bei einer Erwärmung des Klimas in unseren langfristigen RBM. Das gilt sowohl für eine Erwärmung von den heutigen in Deutschland vorherrschenden Bedingungen zu wärmerem Klima, als auch zur Erwärmung von kalten Klimaregionen in Nordeuropa zu gemäßigtem Klima.

Tabelle 7: Anbauflächen, Ernten und daraus berechnete Erträge von landwirtschaftlichen Pflanzen in den Referenzklimaregionen (FAO, 2010). Die Kategorie stärkehaltige Wurzeln und Knollen beinhalten Kartoffeln.

Anbaufläche [km²]					
Land	Referenzklimaregion	Getreide	Stärkehaltige Wurzeln und Knollen	Gemüse	Früchte
Finnland	Turku Sodankylä	11,331	264	88	-
Deutschland	Magdeburg Hannover Ulm	69,084	2,637	1,129	-
Italien	Rom	34,538	710	5,234	-
Marokko	Marrakesch	53,167	634	1,885	-
Russische Föderation	Rostow	417,157	21,824	7,654	-
Spanien	Santander Valladolid	60,433	866	3,538	-
Produktion [1000t]					
Land	Referenzklimaregion	Getreide	Stärkehaltige Wurzeln und Knollen	Gemüse	Früchte
Finnland	Turku Sodankylä	4,261	755	251	19
Deutschland	Magdeburg Hannover Ulm	49,748	11,618	3,576	2,701
Italien	Rom	17,392	1,761	13,645	18,123
Marokko	Marrakesch	5,331	1,548	5,271	2,881
Russische Föderation	Rostow	95,079	31,134	14,827	3,067
Spanien	Santander Valladolid	17,872	2,513	13,626	14,373
Ertrag [t/km²]					
Land	Referenzklimaregion	Getreide	Stärkehaltige Wurzeln und Knollen	Gemüse	Früchte
Finnland	Turku Sodankylä	376	2,861	2,845	-
Deutschland	Magdeburg Hannover Ulm	720	4,406	3,166	-
Italien	Rom	504	2,481	2,607	-
Marokko	Marrakesch	100	2,439	2,796	-
Russische Föderation	Rostow	228	1,427	1,937	-
Spanien	Santander Valladolid	296	2,902	3,852	-

Änderungen der Landnutzung bei einer Abkühlung, sowohl von heutigen deutschen Bedingungen zu kälterem Klima, als auch von warmen Klimareferenzregionen zu gemäßigten Bedingungen, werden allgemein nicht so ausgiebig betrachtet, da sich die meisten Klimamodelle und Forschungsvorhaben zur Zeit auf eine Erwärmung des Klimas durch

Klimawandel konzentrieren. Trotzdem kann man für einige landwirtschaftliche Entwicklungen plausible Voraussagen treffen, da diese über längere Zeit gesehen eine einfache Umkehrung der Vorgänge bei der Erwärmung darstellen (BIOCLIM, 2004).

Bei einer Entwicklung von dem jetzigen gemäßigten Klima in Deutschland zu einem wärmeren Klima kann davon ausgegangen werden, dass das Wasserdefizit in den Anbaumonaten für landwirtschaftliche Produkte ansteigt. Um dieses Wasserdefizit auszugleichen, müssen größere Flächen stärker bewässert werden (BIOCLIM, 2004; Ciscar et al., 2011; Falloon und Betts, 2010; IPCC, 2007).

Vergleicht man die aus den Daten der FAO ermittelten Erträge für Gemüse, Getreide und stärkehaltige Wurzeln und Knollen (**Tabelle 7**) mit den Daten für die Verzehrsgewohnheiten dieser Länder (**Kapitel 5.3, Tabelle 8**) so erkennt man einen verstärkten Trend zu Gemüse und eine Abnahme der verzehrten Kartoffelmenge in wärmeren Klimaregionen (FAO, 2007, 2010). Trotz verringerten Erträgen von Getreide in wärmeren und trockenen Klimaregionen verglichen mit gemäßigtem und feuchtem Klima bleibt der Getreideverbrauch gleich oder erhöht sich sogar drastisch. Dementsprechend müssen für den Getreideanbau größere Flächen bereitgestellt werden, wenn eine selbstversorgende Gemeinschaft angenommen wird. Früchte bilden in den wärmeren Klimazonen einen wichtigen Bestandteil der Ernährung und werden dementsprechend häufig angebaut und der Wasserbedarf einer Durchschnittsperson wird vermutlich ansteigen. Bedingt durch die Erwärmung werden die Wachstumsperioden der landwirtschaftlich genutzten Pflanzen länger (BIOCLIM, 2004; Ciscar et al., 2011; Falloon und Betts, 2010; IPCC, 2007).

Aufgrund des erhöhten Niederschlages in den Wintermonaten wird sich die Grundwasserneubildung voraussichtlich nicht ändern (Döll und Flörke, 2005) oder leicht absinken (Kundzewicz et al., 2008). Allerdings erhöht sich die Entnahme von Grundwasser zur Bewässerung und als Trinkwasser, was zu niedrigeren Grundwasserflurabständen führen kann.

Nach Perioden der Abkühlung zu borealen Klima, oder im Extremfall zu Tundra-klimazuständen, kommt es laut BIOCLIM immer wieder zu einer Erwärmung hin zu gemäßigten Klimazuständen. Diese Erwärmung wird ähnliche Auswirkungen haben, wie die modellierten Auswirkungen der jetzigen Klimaerwärmung auf die Landwirtschaft Nordeuropas in den nächsten hundert Jahren. Sie wird aufgrund verlängerter Wachstumsperioden und verbesserter Kultivierungsbedingungen zu einer Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktivität führen (BIOCLIM, 2004; Falloon und Betts, 2010; IPCC, 2007). Dies führt zu einer Verringerung des Verzehrs von tierischen Produkten und zu einem verstärkten Verzehr von frischen pflanzlichen Nahrungsmitteln. Besonders ausgeprägt ist die Verbesserung der landwirtschaftlichen Situation bei einer Erwärmung von Permafrost Bedingungen, wo kein Ackerbau möglich ist, zu wärmerem borealen oder gemäßigten Klima. Die Böden werden allgemein trockener und es kommt seltener zu anaeroben Bedingungen im Ackerboden. Dies beeinflusst die

Speziation einiger Radionuklide stark, wodurch sich deren Migrationseigenschaften im Boden und der Transfer zu Pflanzen ändern können (Koch-Steindl und Pröhl, 2001). Der Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft steigt, die Grundwasserneubildung ändert sich kaum (Döll und Flörke, 2005). Bei der Rückentwicklung des wärmeren zu gemäßigttem Klima und des gemäßigten zu kaltem Klima kehren sich für unser Modell die oben genannten Entwicklungen um.

Eventuelle Auswirkungen des Klimawandels auf die in den Referenzregionen vorkommenden Bodenarten werden so behandelt, dass eine Übertragung der jetzt in den entsprechenden Klimareferenzregionen vorherrschenden Bodentypen in die deutschen Referenzregionen vorgenommen wird. Durch den Klimawandel werden möglicherweise Eigenschaften dieser landwirtschaftlich genutzten Böden verändert. Ein für unser Modell wichtiger Parameter, der dadurch beeinflusst werden kann, ist der Transfer Faktor von Radionukliden aus dem Boden in die Pflanzen. Für die Transfer Faktoren Boden zu Pflanze in gemäßigten Klimazonen gibt es ausgiebige Parametersammlungen und für einige Radionuklide, Pflanzenarten und Bodentypen in den Subtropen kleinere Sammlungen (IAEA, 2009, 2010). Bedauerlicherweise sind für landwirtschaftliche Flächen in borealen Klimazonen hauptsächlich experimentell ermittelte Daten für Cäsium und kaum Daten für andere Radionuklide vorhanden (Paasikallio et al., 1994; Rosen, 1996; Rosen et al., 1996). Die Daten, die für Radionuklide außer Cäsium vorhanden sind, sind in natürlichen Umgebungen wie Wäldern gemessen worden. Da für unser Modell landwirtschaftlich genutzte Böden relevant sind, werden die Daten aus natürlichen Lebensräumen nicht genutzt, da diese wichtige Unterschiede aufweisen. So vermindert zum Beispiel schon eine vorhergehende Düngung mit kaliumhaltigen Dünger die Aufnahme von Cäsium durch Pflanzen entscheidend (Rosén et al., 2011).

Für das Modell werden, soweit vorhanden, die Transferfaktoren Boden zu Pflanze für die subtropischen Klimareferenzregion Rom, Valladolid und Marrakesch (**Tabelle 13**) und für die borealen Referenzregionen Sodankylä, Turku und im verringerten Maße Vardo entweder aus Parametersammlungen oder direkt aus der Literatur verwendet (**Tabelle 18**). Für die Bodentypen und Pflanzen, für die keine spezifisch subtropischen oder borealen Daten vorhanden sind, werden die Daten für die gemäßigten Klimaregionen verwendet (**Tabellen 14-17**).

4: Analyse der relevanten Prozesse

4.1: Komplette Interaktionsmatrix nach BIOMOVSI und BIOMASS

Interaktionsmatrizen dienen zusammen mit den FEP Listen der Erstellung von kompletten Modellen nach der BIOMASS Methodologie. Eine komplette, leicht modifizierte Interaktionsmatrix nach BIOMOVSI und BIOMASS wird in **Abbildung 13** dargestellt (van Dorp et al., 1999; IAEA 2003). In den diagonalen Matrixfeldern sind dabei die für unser Modell ausgewählten Kompartimente angegeben. Oberhalb und unterhalb der Diagonalen sind Vorgänge und Stoffflüsse zwischen den Kompartimenten beschrieben. Oberhalb der Diagonalen wirken die links stehenden auf die rechts davon stehenden Kompartimente ein, unterhalb der Diagonalen umgekehrt.

BIOMASS schlägt für ein einfaches Biosphärenmodell eine Interaktionsmatrix mit folgenden Elementen vor: Quellterm, Atmosphäre, Fluss, bewässerter Boden, Feldfrüchte, Nutztiere, exponierte Gruppe und Senke. In unserem Modell ist der Quellterm Grundwasser und eine festgelegte Radionuklidkonzentration im Boden. Anstelle eines Flusses nehmen wir Oberflächenwasser mit Seen und Flüssen an. Zusätzlich zum landwirtschaftlich genutzten Boden werden Sedimente betrachtet, die die Radionuklidkonzentration im Oberflächenwasser verringern. Feldfrüchte werden in unserem Modell mit Grass allgemein zu der Kategorie Pflanzen erweitert.

Im Folgenden werden mögliche Interaktionen zwischen den Kompartimenten besprochen und diejenigen ausgewählt, die für unser Modell von Belang sind. Dabei werden in den einzelnen Unterpunkten die Interaktionen des in der Überschrift genannten Kompartiments mit den anderen Kompartimenten, die vorher noch nicht genannt wurden, besprochen.

4.1.1 Grundwasser

Als Quellterm wird in dem Biosphärenmodell Grundwasser mit einer festen Radionuklidkonzentration von 1 Bq/l angenommen. Die Radionuklidkonzentration im Grundwasser verringert sich aufgrund des ständigen Nachflusses nicht. Das Modell lässt jedoch die Verwendung von zeitabhängigen Parametern, die eine Änderung dieser Konzentration nachbilden, zu.

Grundwasser interagiert über den Matrixpunkt B1 mit dem Oberflächenwasser, welches aus Flüssen und Seen besteht. Dabei werden gelöste Radionuklide mit dem Wasserfluss weitergegeben. Ein möglicher Faktor, der hier in Betracht gezogen werden muss, ist eine Wasseraufbereitung vor dem Zufluss in Oberflächengewässer.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Grundwasser	Wasserzufluss Wasser- aufbereitung	Wasserfluss mit gelösten Stoffen	Be- wässerung (9)	Ausgasung	Aufnahme über Blätter	Trinkwasser	Trinkwasser	Abfluss
2	Grundwasser- neubildung	Oberflächen- wasser	Sedi- mentation	Flutung Diffusion Sedi- mentation Erosion Be- wässerung	Aerosol Formation Ausgasung Verdunstung	Aufnahme Be- wässerung	Trinkwasser Aufenthalt im Wasser	Trinkwasser Aufenthalt im Wasser	Abfluss
3	Lösung von Stoffen im Grundwasser	Sediment Resuspension	Sediment	Ablagerung Ausbaggern	Aerosol Formation Ausgasung Verdunstung	Aufnahme Externe Kontami- nation	Aufnahme Externe Kontamination	Aufnahme Externe Kontamination	Ab- transport
4	----	Erosion Abfluss	Überflutung Zusammen- bruch von Ufer- böschungen	Boden	Staub- formation	Wurzel- aufnahme Externe Belastung	Aufnahme von kontaminiertem Material externe Belastung	Direkte Aufnahme Externe Belastung Bau-material	Aus- waschen
5	-----	Niederschlag Deposition	Wind Erosion Niederschlag	Deposition Nieder- schlag Wind Erosion	Atmosphäre	Deposition Niederschlag Inhalation C14	Inhalation C14 Deposition	Inhalation Inhalation C14	Wind
6	Nur für wenige Pflanzen	Kontamination	Bioturbation Kontamination	Bioturbation Kontami- nation	Exhalation Transpiration Verbrennung	Pflanzen	Fütterung Baumaterial	Nahrung Baumaterial	Export
7	----	Kontamination	Bioturbation Kontamination	Bioturbation Kontami- nation	Exhalation Transpiration Verbrennung	Düngung Kontami- nation	Tiere	Nahrung Kleidung	Export
8	Ver- schmutzung Aufbereitung	Ver- schmutzung	Ausbaggern	Land- wirtschaft Kontami- nation Ver- schmutzung	Verschmutzung Filtration Ventilation	Land- wirtschaft Lagerung	Landwirtschaft Lagerung Jagd	Mensch	Export
9									Senke

Abbildung 13: Komplette Interaktionsmatrix modifiziert nach BIOMOVSI und BIOMASS (Dorp et al., 1999; IAEA, 2003). Im Modell betrachtete Prozesse sind fett gedruckt.

Da wir die konservative Annahme treffen, dass die exponierte Gruppe keine Gegenmaßnahmen gegen eine eventuelle Kontamination trifft, wird eine Radionuklidkonzentration im Oberflächenwasser angenommen, die der des Grundwassers entspricht. Diese Konzentration wird allerdings zur Berechnung der Belastung von Speisefisch durch Bindung von Radionukliden an Sedimente (C1) und eine Umwälzungskonstante des Wassers verringert. Eine weitere Verdünnung durch Regen oder von außerhalb zufließendem Süßwasser wird nicht angenommen.

Eine Interaktion des Grundwassers mit dem Sediment (C1) ist theoretisch ebenfalls gegeben. Da die Radionuklidkonzentration im Oberflächenwasser allerdings im Modell der des Grundwassers gleichgesetzt wird, ist diese Interaktion schon mit der Oberflächenwasser-Sediment Interaktion (C2) abgedeckt. Es wird angenommen, dass es zu keiner Verdünnung des Oberflächenwassers mit Regen oder mit von außerhalb des kontaminierten Gebietes zufließenden Wassers kommt.

Das Grundwasser wird zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen herangezogen und bringt theoretisch Radionuklide in diese Böden ein (D1). In unserem Modell arbeiten wir allerdings vorläufig mit einer festen Radionuklidkonzentration im Boden. Interaktionen des Grundwassers mit der Atmosphäre sollen in einem ^{14}C Modell über Ausgasung modelliert werden (E1). Eine direkte Aufnahme von Radionukliden über die Blätter von Nutzpflanzen während Beregnungsbewässerung wird im Matrixpunkt F1 berücksichtigt. Zusätzlich werden Radionuklide von Nutztieren und Menschen aufgenommen, wenn das Grundwasser als Trinkwasser verwendet wird (G1, H1). Ein Abfließen des Grundwassers aus dem betrachteten Gebiet ist ein Beispiel einer Interaktion mit der Senke (I1).

Rückflüsse aus den anderen Kompartimenten in das Grundwasser werden nicht modelliert, da das Grundwasser den Quellterm repräsentiert.

4.1.2 Oberflächenwasser

Oberflächenwasser wird in dem Modell zur Zucht von Speisefisch verwendet. Gespeist wird es aus dem Grundwasser, ohne Verdünnung durch Niederschlag oder oberirdisch zufließendes Wasser. Oberflächenwasser hat somit dieselbe Radionuklidkonzentration wie das Grundwasser. Zur Berechnung der Radionuklidaufnahme von Speisefisch wird allerdings die aufgenommene Radionuklidkonzentration um an Sediment gebundene und ab sedimentierte Radionuklide und eine Umwälzungs-Rate verringert (C2).

Eine Flutung oder Bewässerung von landwirtschaftlich genutztem Land durch Oberflächengewässer wird nicht gesondert betrachtet, da für die Bewässerung der konservative Fall einer Flutung oder Bewässerung durch Grundwasser angenommen wird. Gleiches gilt für die Diffusion von Oberflächenwasser in den Uferbereichen und für die Sedimentation. Erosion von Bodenschichten durch Überschwemmungen können in das Modell mit eingearbeitet werden, wenn Daten dafür zur Verfügung gestellt werden (D2).

Ein Radionuklidtransfer in die Atmosphäre über Aerosolformation ist nicht vorgesehen. Die Ausgasung von ^{14}C soll in einem zusätzlichen Untermodell abgedeckt werden. Eine Erhöhung der Radionuklidkonzentration durch Verdunstung von Oberflächenwasser wird nicht in das Modell mit integriert, da dies über lange Zeiträume auch zur Erhöhung der Konzentration anderer Stoffe und somit zur Versalzung führen würde (E2).

Da die Wasseraufnahme und Bewässerung der im Modell betrachteten Pflanzen mit Grundwasser geschieht, werden diese Transferwege für Oberflächenwasser nicht betrachtet (F2). Ähnliches gilt für die

Trinkwasseraufnahme von Mensch und Tier (G2, H2). Die Aufenthaltsdauer von Menschen im Oberflächenwasser, etwa zum Baden, sollte so kurz sein, dass nur eine vernachlässigbare externe Belastung gegeben ist.

Eine Resuspension von Sediment in das Grundwasser (B3) ist durch die Sedimentationsrate (C2) schon abgedeckt, da diese die Nettostoffflüsse beschreibt. Eine Erosion von landwirtschaftlichem Boden durch Überschwemmungen oder Uferabbrüche kann in das Modell mit eingearbeitet werden, wenn entsprechende Daten zur Verfügung gestellt werden (B4). Der Zufluss von Wasser und Radionukliden über Niederschlag und Deposition wird nicht mit berücksichtigt, da der Quellterm für das Modell das Grundwasser und nicht die Atmosphäre ist (B5).

Eine Kontamination des Oberflächenwassers durch Radionuklide in pflanzlichen und tierischen Ausscheidungen und Kadavern sowie durch menschliche Einwirkung wird nicht angenommen. Allgemein wird in dem Modell die Übertragung von Radionukliden über menschliche und tierische Ausscheidungen in landwirtschaftliche Böden oder Oberflächengewässer nicht betrachtet. Pflanzenreste werden an Nutztiere verfüttert und verschiedene Bestandteile von Tierkadavern werden in selbstversorgenden Gemeinschaften auch verwertet (B6, B7, B8). Da es hierfür allerdings keine systematischen Parameter gibt, werden diese Expositionspfade noch nicht berücksichtigt.

4.1.3 Sediment

Eine Ablagerung von Sedimenten durch Überflutung, Landneubildung oder Ausbaggern wird in dem Modell noch nicht mit berücksichtigt. Wenn Daten, wie Verteilungskoeffizienten für Sediment oder Ablagerungsraten für die unterschiedlichen Referenzklimaregionen für diese Vorgänge bereitgestellt werden, können diese Vorgänge in das Modell integriert werden (D3). In der Sediment-Atmosphäreninteraktion werden Aerosolformation, Ausgasung und Verdunstung ebenso wie in der Oberflächenwasser-Atmosphären-Interaktion nicht behandelt (E3). Da Landwirtschaft in diesem Modell nicht direkt auf Sediment, sondern höchstens auf in landwirtschaftliche Böden umgewandeltem Sediment betrieben wird, wird eine direkte Sediment-Pflanzen-Interaktion nicht mit berücksichtigt (F3).

Bei den in den betrachteten Klimazonen vorherrschenden landwirtschaftlichen Praktiken und Lebensgewohnheiten ist ein längerfristiger Aufenthalt in oder auf Sedimenten nicht vorgesehen (G3, H3). Allgemein werden trockengefallene Sedimente im Modell als landwirtschaftliche Böden behandelt.

Ein Übergang von landwirtschaftlichen Böden in Sedimente durch Überflutung oder Zusammenbruch von Uferböschungen wird in dem Modell nicht betrachtet (C4). Winderosion und Aktivitätsverdünnung durch Niederschlag wird ebenfalls nicht betrachtet (C5). Bioturbation durch Pflanzen und Tiere sowie Kontamination durch Tier und Pflanzenkadaver und Ausscheidungen wird, ebenso wie für Oberflächenwasser und landwirtschaftliche Böden, nicht berücksichtigt, da hierfür systematische Messdaten fehlen (C6, C7). Großräumige Änderungen der Biosphäre durch den Menschen, etwa durch Ausbaggern von Sedimenten, werden nicht angenommen (C8).

4.1.4 Landwirtschaftliche Böden

Landwirtschaftlich genutzte Böden werden als Quellterm mit einer festen Radionuklidkonzentration von 1 Bq/kg behandelt. Sie übertragen Radionuklide über Staubformation in die Atmosphäre (E4). Je trockener das Klima umso größer ist in unserem Modell die angenommene Staubformation. Weiterhin werden Radionuklide über Wurzeln an Pflanzen weitergegeben. Eine externe Belastung von Pflanzen wird nicht modelliert, da in diesem Projekt die Belastung von „non human Biota“ nicht betrachtet wird, und diese Belastung auch nicht über die Nahrungskette an die exponierte Gruppe weitergegeben wird (F4). Nutztiere können Radionuklide über an Futterpflanzen anhaftende Bodenpartikel aufnehmen. Eine direkte externe Belastung von Nutztieren wird in diesem Modell nicht betrachtet, da diese Belastung nicht über die Nahrungskette an die exponierte Gruppe weitergegeben wird (G4).

Eine Aufnahme von Bodenpartikeln über pflanzliche Nahrung wird für Menschen nicht mit berücksichtigt, da Nahrungsmittel vor dem Verzehr normalerweise gewaschen werden. Eine externe Belastung der exponierten Gruppe während dem Aufenthalt auf kontaminiertem Boden im Freien wird für den externen Expositionspfad modelliert. Die Verwendung von kontaminiertem Boden als Baumaterial kann zwar nicht ausgeschlossen werden, wird im Modell allerdings nicht betrachtet (H4). Ein Auswandern und Zerfall von Radionukliden aus den oberen Bodenschichten in tiefer gelegene Bodenschichten, die als Senke betrachtet werden, könnte die Radionuklidkonzentration im Boden verringern (I4). Da der Boden allerdings im Moment als Quellterm mit einer festgelegten Radionuklidkonzentration behandelt wird, wird dieser Transportweg nicht berücksichtigt.

Eine Anreicherung von Radionukliden über Niederschlag oder Deposition aus der Atmosphäre wird in diesem Modell nicht in Betracht gezogen, da die Atmosphäre nicht als Radionuklidquelle definiert ist. Eine Erosion der oberen Bodenschichten durch Windverwehung kann in das Modell integriert werden, wenn entsprechende Daten für die Referenzklimaregionen bereitgestellt werden (D5). Kontamination der landwirtschaftlichen Flächen durch Pflanzen und Tiere werden ebenso wie Bioturbation nicht betrachtet. Dazu gehört auch das Unterpflügen von stehengebliebenen Pflanzenresten nach der Ernte (D6, D7). Eine Radionuklidkontamination der landwirtschaftlichen Fläche durch Menschen wird nicht angenommen, mögliche Veränderungen der Bodenparameter durch die Landwirtschaft, zum Beispiel durch Düngung, sind in den Transferfaktoren Boden zu Pflanze inhärent inbegriffen, da diese auf landwirtschaftlichen Flächen ermittelt wurden.

4.1.5 Atmosphäre

Eine Kontamination von Pflanzen und Nutztieren durch atmosphärische Deposition oder über den Niederschlag wird nicht angenommen. Die Aufnahme von ^{14}C aus der Atmosphäre soll in einem ^{14}C Modell beschrieben werden (Avila und Pröhl, 2007) (F5, G5). Das Gleiche gilt für die exponierte Gruppe, wobei hier auch noch die Inhalation von an Staubpartikeln gebundenen Radionukliden mit der Atemluft in dem Modell berücksichtigt wird (H5).

Eine Erhöhung der Radionuklidkontamination der Atmosphäre über Atmung, Transpiration oder Verbrennung von Pflanzen und Tieren wird nicht angenommen (E6, E7). Eine weitere Erhöhung der Radionuklidkonzentration über Verschmutzung durch Menschen und eine Verringerung durch Filtration und Ventilation wird ebenfalls nicht berücksichtigt.

4.1.6 Pflanzen

In Pflanzen gespeicherte Radionuklide werden über die Nahrungsmittelaufnahme auf Tiere und Menschen übertragen. Dies wird in dem Modell über einen Ingestionspfad dargestellt (G6, H6). Eine externe Belastung von Nutztieren oder der exponierten Gruppe durch Verwendung von kontaminiertem Pflanzenmaterial als Baustoffe wird nicht mit berücksichtigt (Garisto et al., 2004).

Ein Radionuklidtransport von Tieren zu Pflanzen über Düngung mit zum Beispiel Gülle, wird in dem Modell nicht berücksichtigt (F7). Die Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Pflanzen sind in dem Modell inhärent berücksichtigt, da diese nach einer Wachstumsperiode abgeerntet werden. Eine Änderung der Radionuklidkonzentration durch Lagerung von Nahrungsmitteln wird aufgrund der hohen Halbwertszeiten der modellierten Radionuklide nicht angenommen (F8).

4.1.7 Tiere

Die im Modell betrachteten landwirtschaftlichen Nutztiere liefern Nahrungsmittel für die exponierte Gruppe (H7). Die Verwendung von tierischen Produkten wie Leder oder Wolle als Material für Kleidung wird nicht als relevanter Expositionspfad angesehen (Garisto et al., 2004). Die Auswirkungen von Landwirtschaft und Jagd auf Nutztiere sind in dem Modell inhärent berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Nutztiere während ihrer Lebenszeit von einem Jahr Radionuklide über die Nahrung aufnehmen und danach geschlachtet werden. Aufgrund der langen Halbwertszeit der betrachteten Radionuklide wird keine Verringerung der Aktivität während der Lagerung der Nahrungsmittel angenommen.

4.1.8 Mensch

Eine Individualbelastung der Mitglieder der exponierten Gruppe wird über die Gesamtbelastung durch die externen, Inhalations- und Ingestionspfade bestimmt. Mit entsprechenden Dosiskonversionsfaktoren wird unter der Annahme einer Grundwasserkontamination von 1 Bq/l und im Falle der $BDCF^W$ und einer Kontamination des landwirtschaftlichen Bodens von 1 Bq/kg im Falle der $BDCF^S$ für alle betrachteten Radionuklide berechnet. Eine Weitergabe von Radionukliden über die Muttermilch an die jüngste Altersgruppe wird nicht modelliert (H8).

4.2: Interaktionsmatrix des Modells

Zur Erstellung eines Modells nach der BIOMASS Methodologie wird aus den FEP Listen eine Interaktionsmatrix erstellt. Diese zeigt schematisch die Wanderung der Radionuklide durch die Biosphäre zum Menschen auf. In den diagonalen Matrixfeldern sind die einzelnen Kompartimente innerhalb des Modells aufgeführt. Oberhalb der Diagonalen sind die Prozesse aufgeführt, die Radionuklide in rechter Richtung in der Matrix transportieren, bzw. Auswirkungen von Kompartimenten auf weiter rechts stehende Kompartimente. Unterhalb der Diagonalen sind die Prozesse aufgeführt, die Radionuklide in linker Richtung in der Matrix transportieren.

Theoretisch ist es, wie in **Kapitel 4.1** gezeigt, möglich, jedes Feld der Interaktionsmatrix mit einem oder mehreren Prozessen zu füllen. Die hier aufgeführten Prozesse wurden aus mehreren Gründen ausgewählt. Erstens bilden diese Prozesse den Großteil der Radionuklidbewegungen innerhalb der Biosphäre ab. Zweitens sind für diese Prozesse für die ausgewählten Referenzklimaregionen Literaturdaten vorhanden. Zusätzliche Prozesse, wie zum Beispiel Erosion (Boden zu Senke) können in das Modell integriert werden, sobald Daten für die ausgewählten Referenzklimaregionen zur Verfügung stehen. Aus diesen Gründen haben wir in **Abbildung 14** eine vereinfachte Interaktionsmatrix für das Referenzbiosphärenmodell vorgestellt.

Grundwasser	Wasser-aufbereitung Sediment			Aufnahme über Blätter	Trinkwasser	Trinkwasser		
	Oberflächenwasser						Sedimentation	
		Boden	Staubformation	Wurzelaufnahme		Externe Belastung		
			Atmosphäre			Inhalation		
				Pflanzen	Fütterung	Nahrung		
					Tiere	Nahrung		
						Mensch		
							Sediment	
								Senke

Abbildung 14: Interaktionsmatrix des Referenzbiosphärenmodells.

4.3: Transferfaktoren Boden Pflanze

4.3.1 Definition und Unsicherheiten

Zur Berechnung der Exposition einer repräsentativen Person ist es notwendig die Aktivität an Radionukliden zu bestimmen, die diese Person aufnimmt. Neben der Aufnahme mit anorganischen Substanzen, etwa Trinkwasser oder von an Staubpartikel gebundenen Radionukliden in der Atemluft, ist die Aufnahme von Radionukliden über pflanzliche und tierische Nahrungsmittel je nach Radionuklid mehr oder weniger relevant. Ein Haupteintrittspunkt von Radionukliden in die Nahrungskette ist deren Aufnahme über die Pflanzenwurzeln aus dem Boden. Zur Quantifizierung der Radionuklidaufnahme dient der Transferfaktor Boden Pflanze, ein meist empirische bestimmter Parameter, der, je nach Quelle, das Verhältnis der Radionuklidaktivität in der Pflanzenfeuchtmasse oder Pflanzentrockenmasse zu der Radionuklidaktivität in der Bodentrockenmasse der Wurzelzone beschreibt (AVV, 2005; Ehken und Kirchner, 2002; IAEA, 2009). Die für dieses Modell verwendeten Transferfaktoren sind in den entsprechenden Parametersammlungen der IAEA für Pflanzentrockenmasse angegeben. Eine Sonderfall sind Früchte, bei denen die Pflanzenfeuchtmasse zur Berechnung der Transferfaktoren verwendet wird (IAEA, 2010).

Ein Schwachpunkt des Transferfaktor Konzeptes ist, dass Pflanzen nur Radionuklide aufnehmen können, die im Boden verfügbar sind und nicht in unlöslicher Form oder fest an Bodenpartikel gebunden vorliegen. Aus diesem Grund hängen Verteilungskoeffizienten, Migrationskoeffizienten und Transferfaktoren für ein gegebenes Radionuklid oft zusammen. Es muss dabei allerdings beachtet werden, dass Pflanzen durch das Ausscheiden von Stoffen die Bodenparameter um ihre Wurzeln herum verändern können, was dazu führen kann, dass im Boden gebundene Elemente für die Pflanze verfügbar werden .

Der Transferfaktor hängt von einer großen Anzahl unterschiedlicher Parameter ab, zum Beispiel den Radionuklideigenschaften, der Art der Deposition, der Zeit, die seit der Deposition vergangen ist, den Bodeneigenschaften, den Eigenschaften der betrachteten Pflanzen und deren Kultivierungsbedingungen (IAEA, 2009, 2010). Da diese Parameter großen Unsicherheiten unterliegen und oft unbekannt ist, wie sich ein bestimmter Parameter auf den Transferfaktor auswirkt, sind die gemessenen und in der einschlägigen Literatur vorgestellten Transferfaktoren ebenfalls uneinheitlich. Zusätzlich ist die Datenlage oft unvollständig, es fehlen etwa Beschreibungen der Bodeneigenschaften, des Klimas oder anderer relevanter Fakten, die einen Hinweis auf die Anwendbarkeit des gemessenen Transferfaktors geben würde.

Da es für die Modellierung jedoch notwendig ist, den Transfer von Radionukliden aus dem Boden in die Pflanzen zu parametrisieren, werden für die Modellierung oft Parametersammlungen verwendet, die Mittelwerte für

Transferfaktoren von verschiedenen Radionukliden und entsprechende Pflanzen und Bodenklassen liefern. Zusätzlich sind teilweise unterschiedliche Transferfaktoren für gemäßigte und subtropische Klimazonen angegeben (IAEA, 2009, 2010; Staven et al., 2003). Da Daten nicht für alle Radionuklide in gleichem Maße verfügbar sind, ist die Datenlage für diese Sammlungen oft sehr heterogen. So ist der Transferfaktor aus Sandboden zu Getreide in gemäßigten Klimazonen im IAEA TecDoc-1616 Bericht für Cäsium ein Mittelwert aus 156 Einzelwerten, während es nur einen Wert für Plutonium gibt. Für andere Radionuklide gibt es keine publizierten Transferfaktoren, so dass hier die Werte für Radionuklide, die sich chemisch und biologisch ähnlich verhalten, verwendet werden (Staven et al., 2003). Da in borealen Klimazonen hauptsächlich Transferfaktoren in naturnahen Räumen gemessen werden, gibt es für diese Klimazone keine umfassenden Sammlungen von Transferfaktoren in landwirtschaftlichen Flächen. Hier müssen Transferfaktoren entweder direkt aus der Literatur oder ersatzweise aus den gemäßigten Klimazonen verwendet werden.

Aus diesem Grund sind Transferfaktoren aus Literatursammlungen hauptsächlich für Biosphärenübersichtsmodelle geeignet, da hier für die betrachteten generischen Biosphären die entsprechenden die Transferfaktoren beeinflussenden Parameter nicht genau definiert werden können oder sollen. Wenn allerdings ein Biosphärenmodell für einen genau definierten Standort erstellt werden soll, ist eine exakte Bestimmung der Transferfaktoren zur Minimierung der Unsicherheiten des Modells wünschenswert. Es muss allerdings weiterhin beachtet werden, dass sich diese Parameter während des Einlagerungszeitraumes aufgrund von Bodenbildungsprozessen und Klimaveränderungen ändern können. Im Folgenden werden einige Faktoren diskutiert, die einen Einfluss auf die Aufnahme von Radionukliden durch Pflanzen haben können.

4.3.2 Faktoren, die den Transferfaktor von Radionukliden in Pflanzen beeinflussen können

Da ein absichtlicher Eintrag von Radionukliden in Freilandböden kritisch zu sehen ist, werden in Freilandversuchen meist Radionuklidkonzentrationen und Transferkoeffizienten von natürlich im Boden vorkommenden Radionukliden, oder mit durch den globalen Fallout der Atombombentests in den 50er und 60er Jahren und den Tschernobyl Unfall abgelagerten Radionukliden gemessen (Bunzl und Kracke, 1987; Calmon et al., 2009; Carini et al., 2006; Dowdall et al., 2003). Zu den am häufigsten untersuchten Radionukliden zählen aus diesem Grund die Isotope von Cäsium. Auf das Verhalten von anderen Radionukliden kann durch die Verwendung von nicht-radioaktiven Isotopen oder Laborexperimente geschlossen werden.

Die so gewonnenen Verteilungskoeffizienten, Migrationsfaktoren und Transferfaktoren sind allerdings aus mehreren Gründen für die Modellierung des Transports von Radionukliden aus Endlagern durch das Grundwasser und die Biosphäre problematisch. Es unterscheiden sich zum Beispiel sowohl der

Zeitverlauf der Kontamination als auch der Eintrittspunkt in die Biosphäre zwischen Fallout und endlagerstämmigen Radionukliden. Laborbedingungen sind zudem immer nur bedingt mit den Bedingungen im Freiland vergleichbar.

Am besten vergleichbar ist die Ablagerung von Fallout-Radionukliden mit aus einem Endlager ausgetretenen Radionukliden, die über Grundwasser und eine Beregnungsbewässerung in die Biosphäre eingebracht werden. In beiden Fällen gelangen die Radionuklide von oben auf die Pflanzen und die oberen Bodenschichten, wobei zuerst oxische Bedingungen mit einem hohen Redoxpotential angenommen werden können. Bei anderen Bewässerungsformen, etwa einer Staubewässerung über Bodenfurchen, bei Flutung der landwirtschaftlichen Flächen oder wenn das Grundwasser direkt auf die oberen Bodenschichten einwirkt, kann es zu anoxischen Bedingungen mit niedrigem Redoxpotential kommen (Brouwer et al., 1985; Laing et al., 2009; Walker, 1989). Diese unterschiedlichen Redoxpotentiale können zu drastischen Unterschieden in den Radionuklideigenschaften über unterschiedliche Speziation führen (Koch-Steindl und Pröhl, 2001; Salbu et al., 2004).

Bei Cäsium konnte eine starke Zeitabhängigkeit des Transferfaktors nach der Ablagerung festgestellt werden. Je länger die Ablagerung zurückliegt, desto mehr Cäsium liegt in gebundener Form im Boden vor und ist für die Pflanzen nicht verfügbar (Absalom et al., 2001; Andersson et al., 2001; Golmakani et al., 2008). Bei einer Bewässerung mit kontaminiertem Grundwasser kommt es dagegen zu einer sich stetig wiederholenden Kontamination. Jahreszeitliche Änderungen von Transferfaktoren konnten ebenfalls in Freilandversuchen beobachtet werden (Baeza et al., 2001; Bunzl und Kracke, 1989; Schneider et al., 2008). Berücksichtigt man dabei noch die Dauer des Sicherheitsnachweises, so wird klar, dass eine genaue Bestimmung des Transferfaktors äußerst herausfordernd ist.

Versuche zur Bestimmung der Transferfaktoren von aus tieferen Bodenschichten aufsteigenden Radionukliden, welche auf die von landwirtschaftlichen Pflanzen durchwurzelten Bodenschichten einwirken, können mit Lysimetern durchgeführt werden. Diese Versuche haben Hinweise dafür geliefert, dass die Höhe des Grundwasserspiegels durch Änderung der Speziation von Radionukliden einen Einfluss auf die Aufnahme von Radionukliden über die Pflanzenwurzeln hat (Gerzabek et al., 1998; Shinonaga et al., 2005; Wheeler et al., 2007; Zhu et al., 2000).

Neben dem Redoxpotential im Boden haben eine Reihe weiterer Bodenparameter wie Bodentextur, Gehalt an organischen Substanzen, pH, Ionengehalt oder Düngungsgrad einen großen Einfluss auf die Transferfaktoren (Bunzl et al., 1998; Golmakani et al., 2008; Kashparov et al., 2007; Kruyts und Delvaux, 2002; Velasco et al., 2009; Wheeler et al., 2007). In kaliumarmen Böden kommt es zum Beispiel zu einer verstärkten Aufnahme von Cäsium in die Pflanze und somit zu erhöhten Transferfaktoren (Camps et al., 2004; Konopleva et al., 2009). Dem kann mit einer entsprechenden Düngung des Bodens entgegengewirkt werden (Lauria et al., 2009; Rosén et al., 2011; Zibold et al., 2009). Oftmals ist für eine ertragreiche landwirtschaftliche Nutzung des

Bodens eine Veränderung der Bodeneigenschaften, etwa durch Düngung und Entwässerung, notwendig.

Im nahen Bereich um die Pflanzenwurzeln, der sogenannten Rhizosphäre, werden die Bodeneigenschaften durch von den Pflanzenwurzeln abgegebenen Substanzen beeinflusst. Zusätzlich verändern symbiotische und pathogene Mikroorganismen die Bodeneigenschaften (Badri und Vivanco, 2009; Ehlken und Kirchner, 2002; Rudrappa et al., 2008; Takeda et al., 2008; Vinichuk et al., 2010; Watt et al., 2006). Die Morphologie der Pflanzenwurzeln bestimmt, aus welchen Bodenschichten Nährstoffe und Wasser aufgenommen werden. Wenn der Hauptteil des Wassers durch Regen oder Beregnungsbewässerung bereitgestellt wird, bilden sich die Pflanzenwurzeln bevorzugt in den oberen Bodenschichten. Ansonsten bilden Pflanzen tiefere Wurzeln, um an bodennahes Grundwasser zu gelangen (Albrecht et al., 2002; Atkinson und Webster, 2001; Baeza et al., 2005). Durch diese Vorgänge werden die Transferfaktoren ebenfalls beeinflusst.

Viele der oben genannten Parameter, und somit auch die Transferfaktoren, werden von dem im untersuchten Gebiet vorherrschenden Klima beeinflusst (Dowdall et al., 2008; Golmakani et al., 2008; IAEA, 2009). Aus diesem Grund werden, soweit vorhanden, unterschiedliche Transferfaktoren für subtropische, boreale und gemäßigte Klimazonen verwendet.

Aus den genannten Gründen sind die verwendeten Durchschnittswerte für Transferfaktoren, die in der Modellierung verwendet werden, immer kritisch zu betrachten. Da allerdings auch die genauen Bedingungen in der modellierten Biosphäre naturgemäß heterogen und nicht genau definiert sind, stellen diese Durchschnittswerte die brauchbarste Näherung dar.

5: Projektion der Prozesse und Mechanismen in die Zukunft unter besonderer Berücksichtigung von Klimaveränderungen

5.1: Einfluss von Klimaveränderungen auf das Grundwasser und Eintrittsort des Grundwassers in die Biosphäre

Wie in **Kapitel 3.2** besprochen, muss während des Sicherheitsnachweiszeitraumes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle von Veränderungen des Klimas ausgegangen werden. Mögliche zukünftige Entwicklungen beinhalten sowohl wärmere als auch kältere Klimazustände im Vergleich zu dem heutigen gemäßigten Klima in Deutschland (BIOCLIM, 2004). Entsprechende Änderungen in Temperatur und Niederschlag beeinflussen dabei nicht nur direkt die Biosphäre, sondern auch das Grundwasser durch veränderte Grundwasserneubildung.

Konkrete Vorhersagen zur Entwicklung des Grundwasserspiegels sind im Allgemeinen relativ schwierig zu treffen, da dazu genaue Daten über die Entwicklung des Klimas, die geologischen Gegebenheiten und menschlichen Einflüsse nötig wären. Das Klima beeinflusst vor allem die Grundwasserneubildung über die Menge des Niederschlages. Bei gleichbleibendem Niederschlag und einer Erwärmung des Klimas kann von einer verringerten Grundwasserneubildung, bei einer Abkühlung von erhöhter Grundwasserneubildung ausgegangen werden (Chen et al., 2002; Döll und Flörke, 2005; IPCC, 2007; Kundzewicz et al., 2008).

Geologische Gegebenheiten beeinflussen die Struktur der Grundwasserleiter. Hier zeigen sich große Unterschiede zwischen den nord- und süddeutschen Referenzregionen (Förster et al., 2010). Anthropogene Einflüsse auf den Grundwasserstand sind vor allem durch Entnahme von Grundwasser für Landwirtschaft, Industrie und als Trinkwasser gegeben.

Eine entscheidende Veränderung der geologischen Gegebenheiten durch Klimawandel wäre durch glaziale Überdeckung oder großräumige Überschwemmung und Sedimentablagerung in den Referenzregionen denkbar. Beide Szenarien sind allerdings für die nächsten 200.000 Jahre in den nord- und süddeutschen Referenzregionen eher unwahrscheinlich (BIOCLIM, 2004), können allerdings für den gesamten Sicherheitsnachweiszeitraum von 1.000.000 Jahren nicht ausgeschlossen werden.

Die Menge des entnommenen Grundwassers wird vermutlich durch Veränderungen des Klimas stark beeinflusst werden. Bei einer Erwärmung mit gleich bleibendem Niederschlag steigt zum Beispiel der Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft. Ebenso erhöht sich der Trinkwasserbedarf der exponierten Gruppe.

Aufgrund der Diskussion um anthropogen verursachten Klimawandel wurden in den letzten Jahren verschiedene Modelle möglicher Klimaentwicklungen und deren Einfluss auf die Biosphäre für die nächsten Jahrhunderte entwickelt

(IPCC, 2007). Der Zeitraum, für den diese Modelle gelten, trifft für unsere Endlagermodelle eher nicht zu, da ein Austritt von Radionukliden in die Biosphäre, wenn überhaupt, erst in vielen tausend Jahren erwartet wird (EPRI, 2009; SKB, 2011). Grundlegende Erkenntnisse über Auswirkungen von Klimaänderungen in den betroffenen Biosphären lassen sich allerdings auf unsere Modelle übertragen.

Da in den meisten Klimamodellen von einer Erwärmung des Klimas in den nächsten hundert Jahren ausgegangen wird, können diese Modelle für Grundwasserneubildung für unsere warmen und trockenen Referenzregionen angewandt werden. Verschiedene Modelle gehen während einer Klimaerwärmung von einer gleichbleibenden bis leicht verringerten Grundwasserneubildung in Deutschland aus (Döll und Flörke, 2005; IPCC, 2007; Kundzewicz et al., 2008). Entsprechend kann bei erhöhtem Verbrauch von Grundwasser davon ausgegangen werden, dass der Grundwasserspiegel bei einer Klimaerwärmung abfallen wird. Dies führt zu einer Erhöhung der bewässerten Fläche und einer Erhöhung der Bewässerungsmengen.

Modelle, die die Auswirkungen einer Abkühlung auf das Grundwasser simulieren, sind kaum vorhanden. Bei einer Abkühlung kann jedoch aufgrund geringerer Evaporation und anthropogenem Wasserverbrauch von einer Erhöhung des Grundwasserspiegels ausgegangen werden, solange sich die Niederschlagsverhältnisse nicht radikal ändern.

Für Permafrost und glaziale Überdeckung kann davon ausgegangen werden, dass das Grundwasser keinen Einfluss auf die Biosphäre nimmt. Ebenso wird es zu keiner Grundwasserneubildung kommen (Beyerle et al., 1998).

5.2: Berechnungsbedürftigkeit von Nutzpflanzen

Einer der Parameter, die in das Modell einfließen und durch Temperatur und Niederschlag beeinflusst werden, ist die Bewässerungsmenge pro Jahr aufgrund eines Wasserdefizits im Boden. Dieses Wasserdefizit ist umso höher, je wärmer und trockener das Klima wird. Da die Niederschläge in vielen Referenzklimaregionen starke Schwankungen im Jahresgang aufweisen, muss bei der Berechnung des Wasserdefizites auch mit berücksichtigt werden, in welchen Monaten Ackerbau betrieben wird.

In den meisten verwendeten Referenzklimaregionen wird Ackerbau in den Frühlings- und Sommermonaten betrieben. Eine Ausnahme hiervon ist die Referenzklimaregion Marrakesch. Da während der heißen und trockenen Sommermonate Ackerbau im Steppenklima extrem schwierig ist, wird angenommen, dass der größte Teil des Ackerbaus während der kälteren und feuchteren Wintermonate stattfindet.

Für das Tundra Szenario wird vorausgesetzt, dass keine Landwirtschaft betrieben wird. Aus diesem Grund ist dort auch keine Bewässerung vorgesehen.

Als Bewässerungsform wird für das Modell eine Beregnungsbewässerung verwendet. Das Wasserdefizit wird, wie in **Kapitel 6** beschrieben, nach **(1)** berechnet und in **Abbildung 15** zusammengefasst. Für Kartoffeln, Blatt und Fruchtgemüse wird der konservative Fall eines Anbaus in einem Gewächshaus angenommen. Da hier Regenwasser als Wasserquelle entfällt, wird die gesamte Bewässerung mit kontaminiertem Grundwasser durchgeführt. Die Klimabedingungen in den Gewächshäusern entsprechen nicht denen des Freilandes, zum Beispiel wärmere Bedingungen in borealen Klimazonen oder höhere Luftfeuchtigkeit in Gewächshäusern trockener Klimazonen. Aus diesem Grund werden für die Bewässerung generische Werte angenommen, die in allen Klimazonen gleich sind.

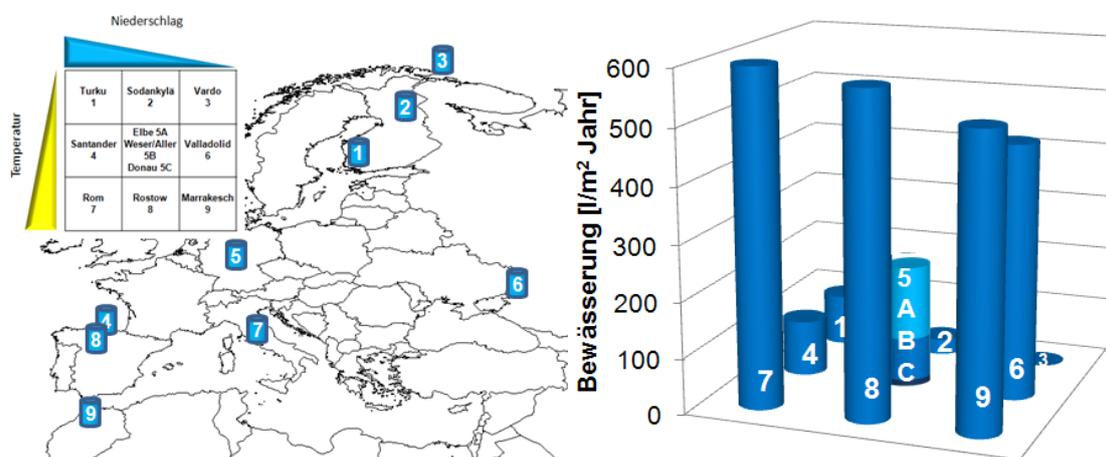


Abbildung 15: Vergleich der theoretischen durchschnittlichen jährlichen Bewässerungsraten für die neun Klimareferenzstationen.

Für Kartoffeln beträgt somit die generische jährliche Bewässerung im Gewächshaus 420 l/m^2 , für Blattgemüse 350 l/m^2 und für Fruchtgemüse 550 l/m^2 (Becker, 2003). Die durchschnittlichen jährlichen Bewässerungsraten im Freiland werden allerdings weiterhin mit den Beiträgen von Kartoffeln, Fruchtgemüse und Blattgemüse berechnet, da diese teilweise auch außerhalb von Gewächshäusern angebaut werden (**Abbildung 15**).

Da der Haupteintrittspunkt der Radionuklide in die Biosphäre in dem Modell über Grundwasser erfolgt, bedingen höhere Bewässerungsmengen auch einen erhöhten Eintrag von Radionukliden in die Biosphäre. In wieweit sich diese auf die Exposition der repräsentativen Gruppe auswirken, hängt sowohl von der direkten Aufnahme von Radionukliden über die Blätter, der Anreicherung der Radionuklide im Boden und dem Transfer von Radionukliden vom Boden in die Pflanze ab. Da in dem vorgestellten Modell mit normierten Radionuklidkonzentrationen im Boden gerechnet wird, fällt allerdings die Anreicherung im Boden als Parameter zur Beurteilung der Auswirkung

unterschiedlicher Bewässerungsmengen aus. Der Einfluss der Bewässerungsmenge wird nur über die Aufnahme von Radionukliden über die Blätter berücksichtigt.

5.3: Ernährungsgewohnheiten

Für viele Radionuklide erfolgt der größte Teil der internen Exposition durch die Aufnahme in der Nahrung und im Trinkwasser. In den ausgewählten Referenzregionen können die Ernährungsgewohnheiten variieren, da verschiedene Nahrungsmittel in unterschiedlichen Klimaregionen kultiviert werden und sich die Ernährungsgewohnheiten der autarken Gemeinschaften daran anpassen. Man geht davon aus, dass alle Nahrungsmittel im kontaminierten Gebiet um das Endlager hergestellt werden. Es kommt dabei nicht zum Verbrauch von importierten, unkontaminierten Lebensmitteln und Getränken.

Diese Annahme ist allerdings bei Gesellschaften auf dem heutigen Entwicklungsstand sehr konservativ. Da alle Datensammlungen, die für die Verzehrsgewohnheiten von Populationen in den Referenzregionen vorliegen, sowohl lokal hergestellte, als auch importierte Lebensmittel enthalten, bilden diese keine autarken Gemeinschaften ab. Da allerdings systematische Daten für rein selbstversorgende Bevölkerungsgruppen nicht vorliegen, werden die vorhandenen Daten zur Definition der Verzehrsgewohnheiten der im Modell abgebildeten exponierten Gruppen verwendet.

Aus diesem Grund muss auch in der Referenzbiosphäre „Tundra“ davon ausgegangen werden, dass eine selbstversorgende Gemeinschaft nicht auf Landwirtschaft, sondern auf dem Sammeln von natürlich vorkommenden Nahrungsmitteln begründet ist. Genaue Daten für die Ernährungsgewohnheiten von rein selbstversorgenden Jäger-Sammler Kulturen liegen nicht vor. Es gibt zwar Studien über die Ernährungsgewohnheiten einheimischer Bevölkerungsgruppen in Tundra-Gebieten (Brustad et al., 2007), diese zeigen jedoch auch den Verzehr von importierten Nahrungsmitteln auf. Aus diesem Grund wurden die Mengen der aufgenommenen Nahrungsmittel, die für eine selbstversorgende Gemeinschaft in der Tundra zur Verfügung stehen, so hochgerechnet, dass von einem Erwachsenen täglich 9500 kJ aufgenommen werden (FAO, 2001).

Die Verzehrsmengen, aufgeschlüsselt nach Lebensmittelarten, sind für die verschiedenen Referenzklimastationen in **Tabelle 8** zusammengefasst. Dabei werden Daten aus verschiedenen Quellen gegenübergestellt (EFSA, 2008; FAO, 2007, 2010; ICRP, 2007; Statistisches-Bundesamt, 2010; StrlSchV, 2008; Teuteberg, 1981). Da die einzige Quelle, die die Verzehrsgewohnheiten aller Länder mit Referenzklimastationen einheitlich abdeckt, die FAO ist, werden in den Modellen für Deutschland die Daten der StrlSchV für alle anderen Referenzstationen die Daten der FAO verwendet.

Die Exposition kann zusätzlich für verschiedene Altersgruppen nach der StrlSchV oder den Vorgaben des ICRP berechnet werden (ICRP, 2007; StrlSchV, 2008). Dabei werden die Altersgruppen von 0-5 Jahren als Kleinkind, von 6-15 Jahren als Kind und über 15 Jahren als Erwachsene behandelt. Die verwendeten Altersgruppen aus der StrlSchV sind 1-2 Jahre, 7-12 Jahre und über 17 Jahre. Zur Berechnung der Nahrungsmengen für die anderen Altersgruppen in den Klimaregionen außerhalb Deutschlands werden die von der FAO gelieferten Verzehrsmengen von Erwachsenen anteilig nach den entsprechenden Werten für Deutschland in der Strahlenschutzverordnung umgerechnet (**Tabelle 26**).

Die Verzehrsgewohnheiten können auch innerhalb eines Landes Unterschiede aufweisen. Als Beispiel sind in **Tabelle 9** die regionalen Unterschiede der Verzehrsgewohnheiten in den Bundesländern der nord- und süddeutschen Referenzregionen aufgelistet (Biesold et al., 2004). Diese Unterschiede werden in dem Modell für die verschiedenen Referenzregionen innerhalb Deutschlands berücksichtigt. Für den süddeutschen Referenzstandort wird der Durchschnitt der Multiplikatoren für Bayern und Baden-Württemberg, für die Region Elbe die Multiplikatoren für Sachsen Anhalt und für die Region Weser/Aller die Multiplikatoren für Niedersachsen verwendet.

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Verzehrsgewohnheiten muss allerdings beachtet werden, dass manche Verzehrsgewohnheiten auch kulturelle und religiöse Gründe haben können und nicht abhängig von klimatischen Bedingungen sind. Ein Beispiel hierfür ist das Meiden von Schweinefleisch aus religiösen Gründen in der Referenzklimaregion Marrakesch. Wenn man allerdings andere, vorwiegend christlich geprägte, Länder mit teilweise ähnlichen Steppen Klimaregionen betrachtet, erkennt man auch dort einen Trend zu relativ geringem Konsum von Schweinefleisch. Beispiele hierfür sind Südafrika mit einem pro Kopf Verbrauch an Schweinefleisch von 3,5 kg pro Jahr oder Mexico mit 13,6 kg (FAO, 2007).

Allgemein können aus den Verzehrsgewohnheiten der Referenzklimaregionen folgende Muster gewonnen werden. In warmen Klimaregionen wird, im Vergleich zum gemäßigten Klima, ein verringerter Konsum von Milch und teilweise von Fleisch und erhöhter Konsum von Getreide, Früchten und Gemüse beobachtet. In kalten Klimaregionen erhöht sich, im Vergleich zu gemäßigtem Klimaregionen, der Konsum von Milch und Süßwasserfisch. Im extrem kalten Tundra Klima ist Ackerbau kaum möglich. Aus diesem Grund muss dort der Nahrungsbedarf einer selbstversorgenden Gemeinschaft durch das Sammeln von Pilzen und Beeren, Jagd, Fischen und beschränkter Viehzucht gedeckt werden.

Unberührt von klimatischen oder kulturellen Einflüssen bleiben zwei Faktoren. Bei normaler Tätigkeit benötigt ein Erwachsener etwa 9500 Kilojoule und 2-3 Liter Wasser pro Tag (FAO, 2001). Ob der Verzehr unterschiedlicher Nahrungsmittel zum Decken dieses Kalorienbedarfs die BDCF verändert, lässt sich durch Anpassung der verzehrten Anteile dieser Nahrungsmittel, zum Beispiel in einem gesonderten Vegetarier-Szenario prüfen.

Tabelle 8: Lebensmittelaufnahme an den unterschiedlichen Referenzklimastationen für Erwachsene in Kilogramm pro Jahr. In der Sparte „Wasser“ wurden alle Getränke, außer Milch, zusammengefasst. Für die Referenzklimastationen wurden die Daten der jeweiligen Länder, Marokko, Italien, Spanien, Deutschland, Russland, Finnland und Norwegen verwendet. Aus den Verzehrsmengen wurden die aufgenommenen Kilojoule pro Tag berechnet. Für das Deutschland Modell von 1900 waren nicht alle Nahrungsmittelgruppen in der entsprechenden Quelle angegeben. Bei Milch, Süßwasserfisch, Geflügel und Eiern wurden die gleichen Mengen wie für das Deutschland 2007 Modell verwendet. Um die Parameter für das 95%-Perzentil zu erhalten, werden die angegebenen Durchschnittswerte mit den 95%-Perzentil Werten der AVV und StrISchV multipliziert. Die Multiplikatoren für die verschiedenen Altersgruppen sind in **Tabelle 26** im Anhang aufgeführt. Zur Berechnung der Verzehrsmengen für die verschiedenen deutschen Referenzregionen werden die Durchschnittswerte von Deutschland 2007, mit in **Tabelle 9** angegebenen Faktoren multipliziert.

kg/Jahr	95%-Perzentil	Deutschland 1900	Deutschland 2007	Marrakesch	Rom	Santander/Valladolid	Rostow	Turku/Sodankylä	Vardo Jäger Sammler	Nährwert kJ/kg
Quelle	AVV StrISchV	Teuteberg 1981	StrSchV FAO	FAO	FAO	FAO	FAO	FAO		
Trinkwasser	2	730.0	730.0	1100.0	1100.0	730/1100.0	1100.0	730.0	730.0	0
Milch	2			44.5	256.1	177.5	172.5	361.7	261	2675
Süßwasserfisch	5	130.0	1.3	0.1	2.2	2.8	3.8	11.7	10.6	5016
Rindfleisch	2	15	13.2	5.7	24.1	15.1	17.8	18.6		7817
Schweinefleisch	2	22.5	55.7	0.0	44.8	61.7	18.1	34.3		6730
Geflügel	2		15.5	13.5	15.9	27.6	22.3	17.2		4264
Lamm	2	1.0	0.7	4.6	1.4	4.6	1.3	0.5	5.6	6270
Eier	2		12.0	6.5	11.6	14.9	14.3	8.6		6437
Getreide	2	133.9	110.0	254.5	156.9	97.5	152.5	107.6		13083
Obst	3	43.3	35.0	69.7	144.2	88.0	71.5	93.8		2090
Kartoffeln	3	227.6	55.0	39.1	39.3	73.5	133.5	68.8		2968
Blattgemüse	3	15.3	13.0	34.1	38.0	38.9	28.5	19.8		711
Fruchtgemüse	3	46.1	40.0	102.3	113.9	116.8	85.4	59.4		711
Rentier									350.0	7148
Beeren									64.0	2968
Pilze									31.0	627
kJ/Tag		9190	7380	10904	10728	8363	9748	9310	9582	

Tabelle 9: Relative Unterschiede der Verzehrsgewohnheiten in den Bundesländern der nord- und süddeutschen Referenzregionen (Biesold et al., 2004). Der Bundesdurchschnitt ist 1 (**Tabelle 8**).

Bundesland	Fleisch	Milch	Obst	Gemüse	Kartoffeln	Brot
Bayern	0.81	1.05	1.04	1.11	0.71	0.92
Baden-Württemberg	0.98	1.02	0.92	1.01	0.78	0.93
Niedersachsen	0.94	1.02	0.94	0.9	0.9	1.03
Sachsen-Anhalt	1.35	1.01	1.13	0.99	1.1	1.24

Der Flüssigkeitsbedarf von Menschen steigt mit zunehmender Temperatur an. In dem Modell wird davon ausgegangen, dass in den gemäßigten und kalten Referenzstationen 2 Liter, entspricht etwa 730 Liter pro Jahr (Beyermann et al., 2009; KTBL, 2009), in den warmen Referenzregionen 3 Liter Flüssigkeit pro Tag, entspricht etwa 1100 Liter pro Jahr, von einem Erwachsenen benötigt werden. Dazu zählen alkoholhaltige Getränke, alkoholfreie Getränke und sonstige Getränke wie Tee und Kaffee. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass bei starker körperlicher Arbeit der Energie- und Flüssigkeitsbedarf pro Tag um das 2-4 Fache steigen kann. Feldarbeit, die von einer selbstversorgenden Gemeinschaft naturgemäß durchgeführt werden muss, zählt dabei als schwere körperliche Arbeit. In kalten Klimaregionen wird der Kalorienbedarf im Winter ansteigen. Die Auswirkungen eines erhöhte Nahrungsbedarfs wird für die deutschen Standorte anhand von zusätzlichen Szenarien unter Verwendung von Parametern für das 95% und entsprechender Multiplikatoren (**Tabelle 8**) für die Verzehrsmengen abgeschätzt (StrlSchV, 2008).

Es wird angenommen, dass der größte Teil des verwendeten Trinkwassers aus dem Grundwasser entnommen wird. Dieses Szenario als Voraussetzung für das Modell ist aufgrund der jetzigen Daten für Deutschland realistisch (Bannick et al., 2008).

Berücksichtigt werden folgende Nahrungsmittel:

- Rindfleisch, Schweinefleisch, Hühnerfleisch und Lamm.
- Eier.
- Süßwasserfisch.
- Milch und Milchprodukte, wobei die getrunkene Milch im Moment nicht zu dem Flüssigkeitsbedarf gezählt wird.
- Gemüse, im Modell aufgeteilt in Blattgemüse und Fruchtgemüse.
- Früchte.
- Kartoffeln und Wurzeln.
- Getreideprodukte und Brot.

- Rentier, Beeren und Pilze (Tundra: Gemeinschaften von Hirten, Jägern und Sammlern).
- Alle Getränke (außer Milch) werden unter Wasser zusammengefasst.

Zu Früchten zählen auf Bäumen kultivierte Früchte wie z.B. Äpfel, Birnen und Kirschen. Als Speisefische werden nur Süßwasserfische betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass Fischzucht und Fischfang in stehenden Vorflutern betrieben werden, die durch hydraulischen Anschluss an den Grundwasserkörper kontaminiert sind. Die Radionuklidkonzentration im Vorfluter wird der Radionuklidkonzentration im Grundwasser gleichgesetzt. Es wird keine Verdünnung durch Regen angenommen.

Da in den kälteren Referenzklimaregionen Ackerbau immer schwieriger durchzuführen ist, werden Süßwasserfisch, Rentier, Beeren und Pilze für die nördliche Tundra Referenzklimastation in einem getrennten Jäger- und Sammler- Modell berücksichtigt. Außerdem wurde ein gewisses Maß an Viehzucht, etwa von Schafen und Milchkühen, angenommen. Vor allem in der Tundra kommt aus dem Wildtier- und Viehbestand ein wichtiger Teil der Ernährung von einheimischen autarken Bevölkerungsgruppen. Für diese Nahrungsmittel wurden jährliche Verzehrsmengen berechnet, die einen Erwachsenen mit etwa 9500 kJ pro Tag versorgen (**Tabelle 8**) (FAO, 2001). Nahrungsmittel, die aus dem Meer gewonnen werden, wie Salzwasserfisch, Robben, Walross oder Wal, werden in dem Modell nicht berücksichtigt, da von einer im Inland lebenden Gemeinschaft ausgegangen wird (Brustad et al., 2007).

Da die Angaben zu den Verzehrsgewohnheiten in den meisten Fällen nicht von selbstversorgenden Gruppen ausgehen, sind die entsprechenden Daten kritisch auszuwählen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden Lebensmittel im großen Maßstab importiert. Deshalb ist zum Beispiel der Verzehr von Zitrusfrüchten in Deutschland recht ausgeprägt. Bei selbstversorgenden Gemeinschaften in gemäßigten und kalten Klimazonen würden diese Zitrusfrüchte wegfallen. Der Vitaminbedarf muss dann aus anderen Quellen, zum Beispiel Gemüse, einheimischen Früchten oder Beeren gedeckt werden.

Neben der Variation der Verzehrsgewohnheiten der verschiedenen Klimaregionen wurde auch die Veränderung der Zusammensetzung der Ernährung während der letzten 100 Jahre in Deutschland betrachtet. Aus dem Vergleich mit dem jetzigen Zustand kann man Rückschlüsse über den historischen Schwankungsbereich gewinnen. Obwohl die Landwirtschaft vor 100 Jahren noch nicht derart technisiert war wie heute, war der Ernährungsstand der Bevölkerung sehr gut. Durch Einführung von Kunstdünger und Verbesserung der landwirtschaftlichen Methoden hatte sich die Versorgungslage der Bevölkerung seit der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts stetig verbessert (Teuteberg, 1981). Insgesamt wurde, im Vergleich zu heute, etwas weniger Fleisch, dafür umso mehr Kartoffeln konsumiert (**Tabelle 8**). Der Vitaminbedarf wurde durch einheimische Früchte und nicht wie heute durch importierte Südfrüchte gedeckt. Der Konsum an raffiniertem Zucker ist zwar ebenfalls stark angestiegen (Statistisches Jahrbuch Deutsches Reich 1907,

Statistisches Jahrbuch 2010), allerdings wird Zucker als stark bearbeitetes Lebensmittel in unserem Modell nicht behandelt.

5.4: Spektrum an Nutzpflanzen und Haustieren

Durch eine Änderung des Klimas kann es zu einer Verschiebung der bevorzugt angebauten Nutzpflanzen und gezüchteten Nutztieren kommen. Diese Verschiebungen werden durch die Verzehrsgewohnheiten der Bevölkerung von verschiedenen Referenzklimaregionen abgebildet. Bei einer Änderung des Klimas werden diese geänderten landwirtschaftlichen Praktiken und Verzehrsgewohnheiten entsprechend in das Referenzbiosphärenmodell übertragen. Es wird vereinfacht angenommen, dass die landwirtschaftliche Produktion einer selbstversorgenden Gemeinschaft den Verzehrsgewohnheiten von Bevölkerungsgruppen in derselben Klimaregion entspricht. Da die gängigen Parametersammlungen meist nicht zwischen verschiedenen Getreide, Gemüse oder Fruchtarten unterscheiden, wird eine Verschiebung dieser Sorten bei einem Klimawandel nicht berücksichtigt (IAEA, 2009, 2010).

6: Entwicklung von radioökologischen Biosphärenmodellen

In diesem Kapitel sollen die mathematischen Grundlagen für das Modell beschrieben werden. Die mathematische Formulierung folgt der AVV und dem deutschen Modell im Rahmen des BIOMOSA Projektes (AVV, 2005; Olyslaegers et al., 2005). Im Gegensatz zu der AVV, die einen Schwerpunkt auf die Belastung von exponierten Gruppen über die Luft, Fallout und Oberflächenwasser legt, konzentriert sich dieses Biosphärenmodell auf die langfristige Belastung durch Radionuklide im Grundwasser auf eine exponierte Gruppe. Die Belastung des Grundwassers entsteht durch einen Austritt von Radionukliden aus einem Endlager. Das belastete Grundwasser wird als Trinkwasser und zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen verwendet. Zusätzlich werden die Parameter des Modells an verschiedene Referenzklimaregionen angepasst, um die Auswirkungen eines Klimawandels auf die Exposition während des Einlagerungszeitraumes abzuschätzen.

Zur Berechnung der Belastung einer exponierten Gruppe sind neben den Komponenten und Parametern des Biosphärenmodells die Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser und landwirtschaftlich genutztem Boden als Quellterme relevant. Da diese von Projektpartnern mit unabhängigen Modellen berechnet werden, stellen die von uns in den Biosphärenmodellen berechneten BDCF nicht die endgültige Exposition dar. Es werden abhängig von der Art der Kontamination zwei unterschiedliche BDCF mit Modell berechnet. Der $BDCF^W$ ist auf eine Aktivität von 1 Bq/l im Grundwasser und 0 Bq/kg im Boden, der $BDCF^S$ auf eine Aktivität von 0 Bq/l im Grundwasser und 1 Bq/kg im Boden normiert. Für beide BDCF wird das gleiche Modell verwendet, lediglich die Quellterme werden modifiziert.

Zusammen mit den Konzentrationen von Radionukliden im Grundwasser und den vom AP-Boden modellierten bio-geogenen Prozessen und daraus resultierenden Radionuklidkonzentrationen in landwirtschaftlich genutzten Böden, können komplette BDCF zur Beurteilung der Belastung der exponierten Gruppe berechnet werden.

Ein Überblick über die Formeln, die für das Modell verwendet werden wird in **Abbildung 16** gegeben. In dem Modell wird angenommen, dass ein Kilogramm einem Liter entspricht, beziehungsweise eine Tonne einem Kubikmeter Wasser. Die Parameter werden entweder direkt mit der Gleichung angegeben, im Anhang zusammengefasst oder in den vorhergehenden Kapiteln aufgeführt. Als Quellen für die Parameter wurde gängige radioökologische Literatur und Parametersammlungen verwendet (AVV, 2005; Coughtrey und Thorne, 1983; IAEA, 2009, 2010; Till und Grogan, 2008). Wenn für das entsprechende Element ein Parameter nicht in der Literatur zu finden war, wurde der Parameter eines chemisch ähnlichen Elementes übernommen. Das gesamte Modell wurde in der ECOLEGO Software der Firma Facilia implementiert.

C-14 wurde in diesem Biosphärenmodell separat behandelt. Dazu wurde eine Modell von Avila und Pröhl verwendet (Avila und Pröhl, 2008), das in diesem Bericht nicht näher vorgestellt wird.

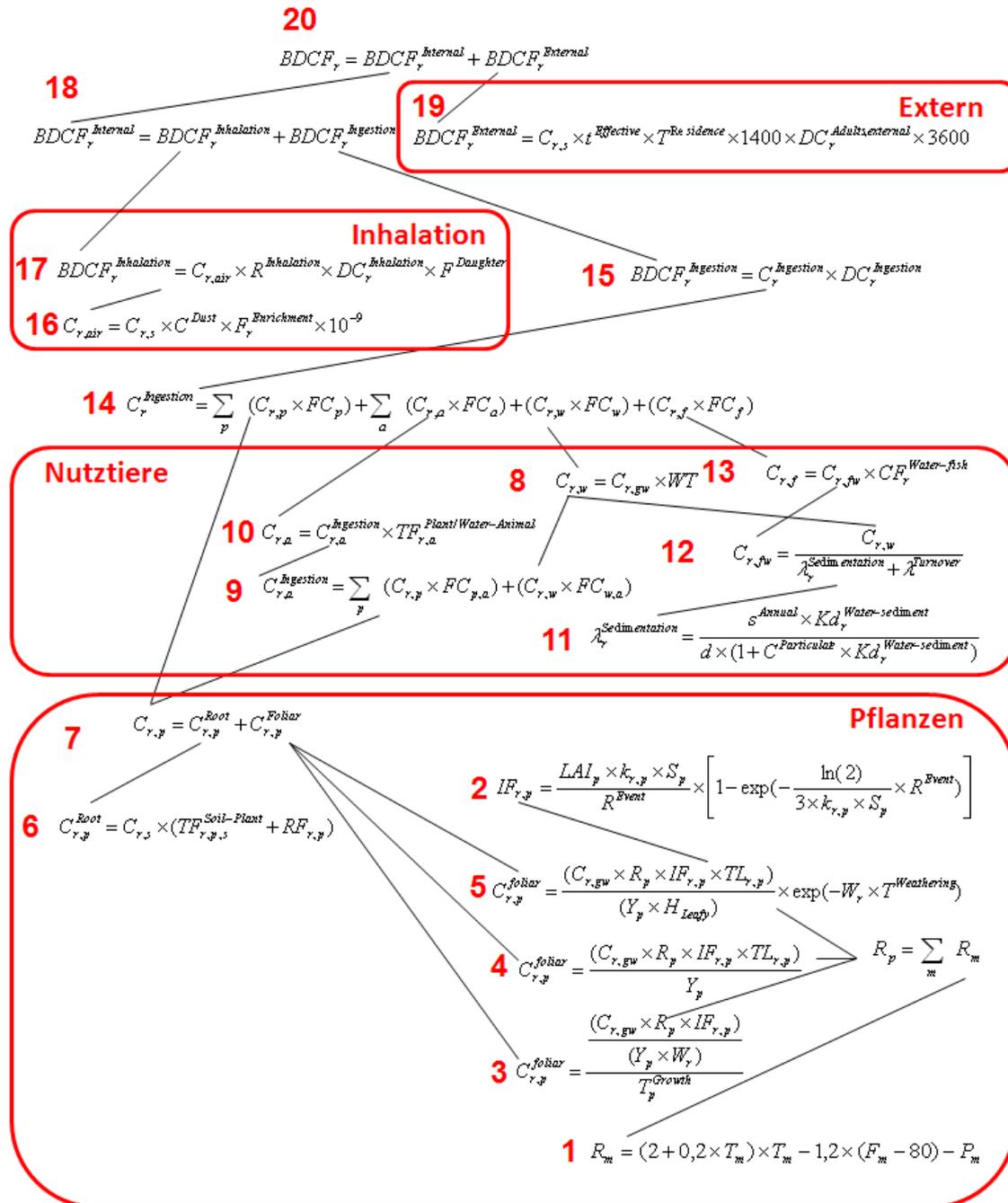


Abbildung 16: Überblick über die im Modell verwendeten Gleichungen. Die roten Zahlen geben die Nummer der in diesem Kapitel beschriebenen Gleichung an. Bei den Parametern bedeutet ein tiefgestelltes r Radionuklid, p Pflanze, s Bodentyp, gw Grundwasser und a Nutztier.

In dem Modell werden Radionuklide über das Grundwasser und den Boden in die Biosphäre eingespeist. Neben dem natürlichen Regen werden landwirtschaftliche Flächen zusätzlich mit Grundwasser bewässert. Das

monatliche Wasserdefizit wird mit folgender Gleichung (Achnich, 1980), mit den Klimadaten aus **Kapitel 3** berechnet.

$$R_m = (2 + 0,2 \times T_m) \times T_m - 1,2 \times (F_m - 80) - P_m \quad (1)$$

Mit:

R_m Bewässerung im Monat m [kg/m²]

T_m Durchschnittstemperatur im Monat m [°C]

F_m Durchschnittliche Luftfeuchtigkeit im Monat m [%]

P_m Durchschnittlicher Niederschlag im Monat m [mm]

Die angenommenen Anbaumonate für die verschiedenen Referenzklimaregionen werden im **Kapitel 9, Tabelle 24** zusammengefasst. Um den jährlichen Bewässerungsbedarf (R_p) für jede Pflanzensorte zu berechnen, werden die Wasserdefizite der entsprechenden Monate addiert. Ein negatives Wasserdefizit, also ein Wasserüberschuss durch hohe Regenfälle, wird dabei nicht mit berücksichtigt.

Pflanzen können Radionuklide über zwei verschiedene Wege, über die Wurzeln aus dem Boden und über die Blätter direkt aus der Beregnung mit Grundwasser zur Bewässerung, aufnehmen.

Zur Berechnung der Radionuklidaufnahme über die Blätter muss ein Abfangfaktor berechnet werden. Bei jeder Bewässerung wird eine gewisse Menge an Radionukliden von den Pflanzenblättern zurückgehalten. Der Abfangfaktor wird nach folgender Gleichung berechnet (Pröhl und Müller, 1996).

$$IF_{r,p} = \frac{LAI_p \times k_{r,p} \times S_p}{R^{Event}} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln(2)}{3 \times k_{r,p} \times S_p} \times R^{Event}\right) \right] \quad (2)$$

Mit:

$IF_{r,p}$ Abfangfaktor für Radionuklid r für Pflanze p

LAI_p Blattflächenindex für Pflanze p [m²/m²]

$k_{r,p}$ Wasserspeicherungskapazität des Blattwerks von Pflanze p [mm]

S_p Rückhaltefaktor für Radionuklid r und Pflanze p

R^{Event} Bewässerungsmenge pro Bewässerungsschritt für Pflanze p [mm]

Für den Rückhaltefaktor wird ein Mittelwert von 0,2 für Grass, Getreide und Mais (Pröhl, 2009) und ein Wert von 0,3 für Kartoffeln, Obst, Blatt- und

Fruchtgemüse angenommen (Müller und Pröhl, 1993). Der Blattflächenindex ändert sich während der Wachstumsperiode der Pflanze, da die Blattfläche im Vergleich zur Bodenfläche während dem Pflanzenwachstum zunimmt. Im Modell werden Mittelwerte für ausgewachsene Pflanzen angenommen. Für Kartoffeln wird ein Wert von 4 und für alle anderen Pflanzen ein Wert von 5 verwendet (Müller und Pröhl, 1993).

Für die Radionuklidaufnahme über die Blätter werden drei Gleichungen für unterschiedliche Pflanzentypen verwendet. **Gleichung 3** gilt für Gras und Mais, **Gleichung 4** für Getreide, Kartoffeln, Obst und Fruchtgemüse und **Gleichung 5** für Blattgemüse.

$$C_{r,p}^{foliar} = \frac{(C_{r,gw} \times R_p \times IF_{r,p})}{\frac{(Y_p \times W_r)}{T_p^{Growth}}} \quad (3)$$

$$C_{r,p}^{foliar} = \frac{(C_{r,gw} \times R_p \times IF_{r,p} \times TL_{r,p})}{Y_p} \quad (4)$$

$$C_{r,p}^{foliar} = \frac{(C_{r,gw} \times R_p \times IF_{r,p} \times TL_{r,p})}{(Y_p \times H^{Leafy})} \times \exp(-W_r \times T^{Weathering}) \quad (5)$$

Mit:

$C_{r,gw}$	Radionuklidkonzentration im Grundwasser [Bq/kg]
$C_{r,p}^{foliar}$	Aufnahme von Radionuklid r über die Blätter von Pflanze p [Bq/kg]
$IF_{r,p}$	Abfangfaktor von Radionuklid r für Pflanze p
H^{Leafy}	Ernten von Blattgemüse pro Jahr [1/a]
R_p	Bewässerungsbedarf für Pflanze p [kg/m ² a]
$TL_{r,p}$	Translokationsfaktor für Radionuklid r für Pflanze p
T_p^{Growth}	Wachstumsperiode für Pflanze p [d]
$T^{Weathering}$	Minimale Abwitterungszeit, hier 25 [d]
W_r	Abwitterungskonstante [1/d]
Y_p	Ertrag von Pflanze p [kg/m ² a]

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Berechnung der Aufnahme von Radionukliden über Pflanzenwurzeln ist der Transfer-Koeffizient Boden zu Pflanze. In der gängigen Literatur sind Transferkoeffizienten für verschiedene Bodentypen vorhanden (IAEA, 2009). Da in dem hier verwendeten Modell der Einfluss von Klimawandel auf die berechneten BDCFs dargestellt werden soll, müssen die Transferkoeffizienten für die verschiedenen Referenzklimastationen modifiziert werden, um die unterschiedliche Verfügbarkeit von Radionukliden in den Böden der Klimareferenzregionen darzustellen. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Transferfaktoren für die gemäßigten, subtropischen und borealen Klimareferenzregionen verwendet. Wenn für die entsprechenden Radionuklide keine nach Klimaregionen getrennten Transferfaktoren bekannt sind, werden die Parameter für gemäßigtes Klima verwendet. Wenn die Transferfaktoren in den entsprechenden Parametersammlungen für Pflanzentrockenmasse angegeben sind, werden sie zunächst in Transferfaktoren für Pflanzenfeuchtmasse umgerechnet (IAEA, 2010).

Die Radionuklidaufnahme über Pflanzenwurzeln wird für alle Pflanzen mit folgender Gleichung berechnet:

$$C_{r,p,s}^{Root} = C_{r,s} \times (TF_{r,p,s}^{Soil-Plant} + RF_{r,p}) \quad (6)$$

Mit:

$C_{r,s}$ Konzentration für Radionuklid r in im Boden für „Brunnen“-Szenario [1 Bq/kg]

$C_{r,p,s}^{Root}$ Wurzelaufnahme von Radionuklid r für Pflanze p in Boden s [Bq/kg]

$RF_{r,p}$ Resuspensionsfaktor für Radionuklid r und Pflanze p

$TF_{r,p,s}^{Soil-Plant}$ Transfer Faktor für Radionuklid r, Pflanze p und Boden s

Die totale Radionuklidkonzentration in Pflanzen wird dann über die Addition der Radionuklidaufnahme über Wurzeln und über Blätter berechnet.

$$C_{r,p} = C_{r,p,s}^{Root} + C_{r,p}^{Foliar} \quad (7)$$

Mit:

$C_{r,p}$ Totale Konzentration für Radionuklid r in Pflanze p [Bq/kg]

$C_{r,p}^{Root}$ Wurzelaufnahme von Radionuklid r für Pflanze p in Boden s [Bq/kg]

$C_{r,p}^{foliar}$ Radionuklidaufnahme über Blätter für Radionuklid r in Pflanze p [Bq/kg]

Brunnenwasser, das als Trinkwasser für Mensch und Tier verwendet wird, kann aufbereitet werden, um Kontaminationen zu entfernen. In diesem Modell wird allerdings angenommen, dass dieses Wasser nicht behandelt oder durch unkontaminiertes Wasser verdünnt wird. Allerdings ist im Modell ein Parameter für Grundwasseraufbereitung/Verdünnung (WT) vorgesehen, der, wenn gewünscht, angewendet werden kann.

$$C_{r,w} = C_{r,gw} \times WT \quad (8)$$

Mit:

$C_{r,gw}$ Radionuklidkonzentration im Grundwasser [Bq/kg]

$C_{r,w}$ Radionuklidkonzentration im Trinkwasser [Bq/kg]

WT Wasseraufbereitungskonstante, im Moment 1 für keine Aufbereitung

Die tägliche Aufnahme von Radionukliden in Rindfleisch, Milch, Schweinefleisch, Geflügelfleisch, Eiern und Schaffleisch aus landwirtschaftlichen Nutztieren wie Kühen, Schweinen, Geflügel und Schafen wird über die Addition der Radionuklidkonzentrationen der täglich verfütterten Mengen der verwendeten Futtermittel Mais, Getreide und Gras zusätzlich zu der Menge des verbrauchten Trinkwassers ermittelt.

$$C_{r,a}^{Ingestion} = \sum_p (C_{r,p} \times FC_{p,a}) + (C_{r,w} \times FC_{w,a}) \quad (9)$$

Mit:

$C_{r,a}^{Ingestion}$ Gesamte tägliche Aufnahme von Radionuklid r für Tier a [Bq/d]

$C_{r,p}$ Totale Konzentration für Radionuklid r in Pflanze p [Bq/kg]

$C_{r,w}$ Radionuklidkonzentration im Trinkwasser [Bq/kg]

$FC_{p,a}$ Aufgenommene Menge der Futterpflanze p von Tier a [kg/d]

$FC_{w,a}$ Aufgenommene Trinkwassermenge von Tier a [kg/d]

Um die Radionuklidkonzentration im entsprechenden Nahrungsmittel zu errechnen, wird die Radionuklidkonzentrationsaufnahme pro Tag mit einem Transferfaktor multipliziert:

$$C_{r,a} = C_{r,a}^{Ingestion} \times TF_{r,a}^{Plant/Animal} \quad (10)$$

Mit:

$C_{r,a}$	Konzentration von Radionuklid r im Tierprodukt a [Bq/kg]
$C_{r,a}^{Ingestion}$	Gesamte tägliche Aufnahme von Radionuklid r für Tier a [Bq/d]
$TF_{r,a}^{Plant/Water-Animal}$	Transferfaktor für Radionuklid r von Pflanzen und Wasser zu Tier a [d/kg]

Für die Berechnung der Radionuklidkonzentrationen in Süßwasserfisch muss die Konzentration der Radionuklide im stehenden Vorfluter, der zur Fischzucht verwendet wird, berechnet werden. Ein Faktor ist hier die Sedimentation von Radionukliden.

$$\lambda_r^{Sedimentation} = \frac{s^{Annual} \times Kd_r^{Water-sediment}}{d \times (1 + C^{Particulate} \times Kd_r^{Water-sediment})} \quad (11)$$

Mit:

$C^{Particulate}$	Partikel Konzentration, im Modell 0,1 [kg/m ³]
d	Tiefe des Gewässers, im Modell 3 [m]
$Kd_r^{Water-sediment}$	Verteilungskoeffizient Wasser-Sediment für Radionuklid r [m ³ /kg]
$\lambda_r^{Sedimentation}$	Sedimentationsrate für Radionuklid r [1/a]
s^{Annual}	Jährliche Sedimentation, im Modell 5 [kg/m ² a]

Die Radionuklidkonzentration im Süßwasser wird dann wie folgt berechnet.

$$C_{r,fw} = \frac{C_{r,w}}{\lambda_r^{Sedimentation} + \lambda^{Turnover}} \quad (12)$$

Mit:

$C_{r,w}$	Radionuklidkonzentration im Wasserzufluss [Bq/kg]
$C_{r,fw}$	Radionuklidkonzentration im Süßwasser [Bq/kg]
$\lambda_r^{Sedimentation}$	Sedimentationsrate für Radionuklid r [1/a]
$\lambda^{Turnover}$	Umwälzungsrate, im Modell 2 [1/a]

Mit dieser Radionuklidkonzentration im Süßwasser kann die Radionuklidkonzentration im Speisefisch berechnet werden.

$$C_{r,f} = C_{r,fw} \times CF_r^{Water-fish} \quad (13)$$

Mit:

$C_{r,f}$ Konzentration von Radionuklid r in Speisefisch [Bq/kg]

$C_{r,fw}$ Radionuklidkonzentration im Süßwasser [Bq/kg]

$CF_r^{Water-fish}$ Konzentrationsfaktor Wasser-Fisch für Radionuklid r

Wenn die Verzehrsgewohnheiten der betroffenen Bevölkerung bekannt sind (**Kapitel 5.3**), kann die über Verzehr aufgenommene jährliche Radionuklidkonzentration berechnet werden.

$$C_r^{Ingestion} = \sum_p (C_{r,p} \times FC_p) + \sum_a (C_{r,a} \times FC_a) + (C_{r,w} \times FC_w) + (C_{r,f} \times FC_f) \quad (14)$$

Mit:

$C_r^{Ingestion}$ Über Verzehr aufgenommene Konzentration für Radionuklid R [Bq/a]

$C_{r,a}$ Konzentration von Radionuklid r im Tierprodukt a [Bq/kg]

$C_{r,f}$ Konzentration von Radionuklid r in Speisefisch [Bq/kg]

$C_{r,p}$ Konzentration von Radionuklid r in Pflanze p [Bq/kg]

$C_{r,w}$ Konzentration von Radionuklid r im Trinkwasser [Bq/kg]

FC_a Verzehrs-Menge von Tierprodukt a [kg/a]

FC_f Verzehrs-Menge von Fisch [kg/a]

FC_p Verzehrs-Menge von Pflanzenprodukt p [kg/a]

FC_w Verzehrs-Menge von Trinkwasser [kg/a]

Mit der über den Verzehr aufgenommenen Radionuklidkonzentration und einem Dosiskonversionsfaktor kann der Biosphären Dosiskonversionsfaktor bedingt durch Nahrungs- und Trinkwasseraufnahme für jedes Radionuklid berechnet werden.

$$BDCF_r^{Ingestion} = C_r^{Ingestion} \times DC_r^{Ingestion} \quad (15)$$

Mit:

$BDCF_r^{Ingestion}$ Durch Nahrungsmittelaufnahme bedingter Biosphärendosis-konversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

$C_r^{Ingestion}$ Jährliche über Nahrung aufgenommene Konzentration von Radionuklid r [Bq/a]

$DC_r^{Ingestion}$ Verzehrbedingter Dosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/Bq]

Zusätzlich zu der Radionuklidaufnahme über die Nahrungskette nimmt die Bevölkerung auch Radionuklide über Inhalation von Bodenpartikeln auf. Die Staubkonzentration ist dabei in ariden Referenzklimaregionen höher als in gemäßigten oder kalten Regionen.

$$C_{r,air} = C_{r,s} \times C^{Dust} \times F_r^{Enrichment} \quad (16)$$

Mit:

$C_{r,air}$ Konzentration von Radionuklid r in der Luft [Bq/l]

$C_{r,s}$ Konzentration von Radionuklid r im Boden s für „Brunnen“- bzw. „Aufsteigendes Grundwasser“ Szenario [Bq/kg]

C^{Dust} Staubkonzentration in der Luft [kg/m³]

$F_r^{Enrichment}$ Anreicherungsfaktor für Radionuklid r

Nun kann der BDCF für die Inhalation verschiedener Radionuklide berechnet werden.

$$BDCF_r^{Inhalation} = C_{r,air} \times R^{Inhalation} \times DC_r^{Inhalation} \times F^{Daughter} \quad (17)$$

Mit:

$BDCF_r^{Inhalation}$ Biosphärendosiskonversionsfaktor für die Inhalation des Radionuklides r [Sv/a]

$C_{r,air}$ Konzentration von Radionuklid r in der Luft [Bq/l]

$R^{Inhalation}$ Inhalationsrate [l/a]

$DC_r^{Inhalation}$ Inhalation Dosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/Bq]

$F^{Daughter}$ Faktor für Tochternuklide

Die BDCF für aufgenommene Nahrungsmittel und Inhalation werden addiert und bilden den internen BDCF.

$$BDCF_r^{Internal} = BDCF_r^{Inhalation} + BDCF_r^{Ingestion} \quad (18)$$

Mit:

$BDCF_r^{Inhalation}$ Biosphärenendosiskonversionsfaktor für die Inhalation des Radionuklides r [Sv/a]

$BDCF_r^{Ingestion}$ Durch Nahrungsmittelaufnahme bedingter Biosphärenendosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

$BDCF_r^{Internal}$ Interner Biosphärenendosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

Da im Modell eine selbstversorgende Gemeinschaft angenommen wird, die auf potentiell kontaminiertem Land lebt und arbeitet, muss ein BDCF für eine externe Radionuklid Exposition in das Modell integriert werden.

$$BDCF_r^{External} = \frac{C_{r,s}}{1000} \times t^{Effective} \times T^{Residence} \times DC_r^{Adults,external} \quad (19)$$

Mit:

$BDCF_r^{External}$ Externer Biosphärenendosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

$C_{r,s}$ Konzentration von Radionuklid r im Boden s für „Brunnen“- bzw. „Aufsteigendes Grundwasser“ Szenario [Bq/kg]

$DC_r^{Adults,external}$ Externer Dosiskonversionsfaktor für Erwachsene und Radionuklid r [Sv/s pro Bq/m²]

$T^{Residence}$ Verweildauer auf kontaminiertem Land [s/a]

$t^{Effective}$ Effektive Dicke der Bodenschicht, die zur externen Exposition durch das Radionuklid r beiträgt [m]

Durch die Addition der Beiträge des externen und internen BDCF erhält man abschließend den totalen Biosphärenendosiskonversionsfaktor BDCF als Endpunkt des Modells.

$$BDCF_r = BDCF_r^{Internal} + BDCF_r^{External} \quad (20)$$

$BDCF_r^{External}$ Externer Biosphärenendosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

$BDCF_r^{Internal}$ Interner Biosphärenendosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

$BDCF_r$ Biosphärenendosiskonversionsfaktor für Radionuklid r [Sv/a]

Für die Berechnung des BDCF für C-14 wurde direkt das Modell und die dazugehörigen Parameter von Avila und Pröhl verwendet (Avila und Pröhl, 2008). Für die Bewässerungsraten wurden die Parameter aus **Tabelle 27** verwendet. Bei der Berechnung für das 95% zur Ernährung an deutschen Standorten wurde von der doppelten Kohlenstoffaufnahme im Vergleich zur Durchschnittsbevölkerung ausgegangen. Das C-14 Modell wurde ansonsten nicht für unterschiedliche Altersgruppen oder Bodenklassen angepasst.

Da der einzige Quellterm, der in das C-14 Modell einfließt, die C-14 Konzentration im Bewässerungswasser ist, und keine Akkumulation von C-14 im Boden angenommen wird, kann für C-14 nur ein $BDCF^W$ und kein $BDCF^S$ berechnet werden.

7: Berechnung von normierten Strahlenexpositionen für Referenzpersonen

Die BDCF wurden für eine normierte Kontamination von 1Bq/l Grundwasser für die $BDCF^W$ oder 1Bq/kg Boden für die $BDCF^S$ berechnet und in Sv pro Jahr angegeben. Da die Bodenart für die $BDCF^W$ keine Auswirkungen hat, wurden die unterschiedlichen Bodentypen für die $BDCF^W$ nicht berechnet.

7.1: $BDCF^S$ für Marrakesch – wärmeres trockenes Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	4.9E-06	5.8E-06	6.1E-06	5.0E-06	5.9E-06	6.2E-06	5.0E-06	5.8E-06	6.1E-06	4.9E-06	5.8E-06	6.1E-06
Am-243	1.4E-06	2.2E-06	3.0E-06	1.4E-06	2.2E-06	3.0E-06	1.4E-06	2.2E-06	3.0E-06	1.4E-06	2.2E-06	3.0E-06
Cl-36	5.0E-05	2.7E-05	1.0E-05	5.8E-05	3.5E-05	1.5E-05	5.5E-05	3.1E-05	1.3E-05	5.4E-05	3.1E-05	1.2E-05
Cm-244	7.2E-07	9.2E-07	9.8E-07	7.2E-07	9.2E-07	9.8E-07	7.2E-07	9.2E-07	9.8E-07	7.2E-07	9.2E-07	9.8E-07
Cs-135	1.1E-08	1.3E-08	1.3E-08	4.9E-08	5.4E-08	3.8E-08	9.3E-09	1.1E-08	1.1E-08	1.0E-08	1.2E-08	1.2E-08
I-129	1.0E-06	1.4E-06	5.2E-07	1.0E-06	1.3E-06	5.1E-07	1.0E-06	1.3E-06	5.1E-07	1.0E-06	1.3E-06	5.1E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	3.2E-09	2.0E-09	9.8E-10	2.8E-09	1.4E-09	5.8E-10	3.7E-09	2.1E-09	1.0E-09	2.5E-09	1.3E-09	5.2E-10
Ni-63	7.8E-09	4.9E-09	2.3E-09	6.8E-09	3.4E-09	1.3E-09	9.0E-09	5.1E-09	2.3E-09	6.1E-09	3.1E-09	1.2E-09
Np-237	9.9E-07	1.3E-06	1.6E-06	9.5E-07	1.2E-06	1.5E-06	9.4E-07	1.2E-06	1.5E-06	9.6E-07	1.2E-06	1.5E-06
Pa-231	8.2E-06	1.5E-05	2.0E-05	8.2E-06	1.5E-05	2.0E-05	8.2E-06	1.5E-05	2.0E-05	8.2E-06	1.5E-05	2.0E-05
Pb-210	6.2E-06	5.9E-06	2.0E-06	1.2E-05	1.2E-05	5.1E-06	7.6E-06	8.7E-06	3.3E-06	7.9E-06	8.9E-06	3.4E-06
Pd-107	2.0E-09	1.1E-09	4.4E-10	2.0E-09	1.1E-09	4.4E-10	2.0E-09	1.1E-09	4.4E-10	2.0E-09	1.1E-09	4.4E-10
Po-210	6.3E-06	3.7E-06	1.7E-06	6.3E-06	3.7E-06	1.7E-06	6.3E-06	3.7E-06	1.7E-06	6.3E-06	3.7E-06	1.7E-06
Pu-239	1.1E-06	1.9E-06	2.7E-06	1.1E-06	1.9E-06	2.7E-06	1.1E-06	1.9E-06	2.7E-06	1.1E-06	1.9E-06	2.7E-06
Ra-226	6.3E-06	8.9E-06	4.6E-06	6.3E-06	9.8E-06	4.7E-06	6.1E-06	1.1E-05	5.1E-06	5.4E-06	7.7E-06	3.9E-06
Se-79	3.4E-07	2.5E-07	4.1E-08	3.4E-07	2.5E-07	4.1E-08	3.4E-07	2.5E-07	4.1E-08	3.4E-07	2.5E-07	4.1E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	6.9E-07	2.8E-07	8.0E-08	6.9E-07	2.8E-07	8.0E-08	6.9E-07	2.8E-07	8.0E-08	6.9E-07	2.8E-07	8.0E-08
Th-230	1.6E-06	2.3E-06	2.9E-06	1.6E-06	2.3E-06	2.9E-06	1.6E-06	2.3E-06	2.9E-06	1.5E-06	2.2E-06	2.8E-06
Th-232	1.3E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.3E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.3E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.2E-06	1.6E-06	1.7E-06
U-238	4.7E-07	5.2E-07	4.1E-07	4.4E-07	4.9E-07	3.8E-07	3.9E-07	4.1E-07	3.2E-07	4.4E-07	4.8E-07	3.7E-07
Zr-93	5.6E-10	9.6E-10	2.0E-09	5.6E-10	9.6E-10	2.0E-09	5.6E-10	9.6E-10	2.0E-09	5.6E-10	9.6E-10	2.0E-09

7.2: BDCF^S für Rom - wärmeres feuchteres Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	3.0E-06	3.2E-06	3.2E-06	3.0E-06	3.3E-06	3.3E-06	3.0E-06	3.3E-06	3.3E-06	3.0E-06	3.2E-06	3.2E-06
Am-243	7.9E-07	1.2E-06	1.6E-06	8.0E-07	1.2E-06	1.6E-06	8.0E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.9E-07	1.2E-06	1.6E-06
Cl-36	9.0E-05	4.4E-05	1.4E-05	9.7E-05	5.0E-05	1.8E-05	9.4E-05	4.7E-05	1.6E-05	9.4E-05	4.7E-05	1.6E-05
Cm-244	3.9E-07	4.6E-07	4.9E-07	3.9E-07	4.7E-07	4.9E-07	3.9E-07	4.7E-07	4.9E-07	3.9E-07	4.7E-07	4.9E-07
Cs-135	2.8E-08	2.7E-08	2.4E-08	1.1E-07	1.1E-07	7.8E-08	2.5E-08	2.4E-08	2.1E-08	2.7E-08	2.6E-08	2.4E-08
I-129	2.0E-06	2.4E-06	8.7E-07	2.0E-06	2.4E-06	8.6E-07	2.0E-06	2.5E-06	8.6E-07	2.0E-06	2.4E-06	8.6E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	5.6E-09	2.8E-09	1.2E-09	6.5E-09	2.8E-09	1.1E-09	8.9E-09	3.9E-09	1.6E-09	5.1E-09	2.4E-09	8.5E-10
Ni-63	1.4E-08	7.0E-09	2.7E-09	1.6E-08	7.1E-09	2.5E-09	2.2E-08	9.9E-09	3.8E-09	1.3E-08	5.9E-09	2.0E-09
Np-237	9.1E-07	9.6E-07	1.0E-06	8.9E-07	9.4E-07	9.9E-07	8.8E-07	9.3E-07	9.8E-07	9.0E-07	9.4E-07	1.0E-06
Pa-231	5.0E-06	8.2E-06	1.0E-05	5.0E-06	8.3E-06	1.0E-05	5.0E-06	8.3E-06	1.0E-05	5.0E-06	8.3E-06	1.0E-05
Pb-210	9.7E-06	7.6E-06	2.0E-06	1.5E-05	1.3E-05	4.8E-06	1.0E-05	9.0E-06	2.8E-06	1.0E-05	9.3E-06	2.9E-06
Pd-107	3.5E-09	1.5E-09	5.2E-10	3.5E-09	1.5E-09	5.2E-10	3.5E-09	1.5E-09	5.2E-10	3.5E-09	1.5E-09	5.2E-10
Po-210	7.3E-06	3.3E-06	1.4E-06	7.3E-06	3.4E-06	1.4E-06	7.3E-06	3.4E-06	1.4E-06	7.3E-06	3.4E-06	1.4E-06
Pu-239	5.8E-07	9.7E-07	1.4E-06	5.8E-07	9.8E-07	1.4E-06	5.8E-07	9.8E-07	1.4E-06	5.9E-07	1.0E-06	1.4E-06
Ra-226	8.8E-06	1.1E-05	4.6E-06	9.6E-06	1.2E-05	4.8E-06	6.9E-06	9.8E-06	4.3E-06	7.6E-06	9.2E-06	3.9E-06
Se-79	9.1E-07	5.6E-07	8.4E-08	9.1E-07	5.6E-07	8.4E-08	9.1E-07	5.6E-07	8.4E-08	9.1E-07	5.6E-07	8.4E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	1.4E-06	5.5E-07	1.5E-07	1.4E-06	5.5E-07	1.5E-07	1.4E-06	5.5E-07	1.5E-07	1.4E-06	5.5E-07	1.5E-07
Th-230	1.5E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.5E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.5E-06	1.7E-06	1.7E-06	1.5E-06	1.6E-06	1.7E-06
Th-232	1.4E-06	1.5E-06	1.2E-06	1.4E-06	1.5E-06	1.2E-06	1.4E-06	1.5E-06	1.2E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.2E-06
U-238	5.8E-07	5.2E-07	3.4E-07	5.5E-07	5.0E-07	3.1E-07	5.1E-07	4.5E-07	2.7E-07	5.6E-07	5.0E-07	3.2E-07
Zr-93	4.7E-10	6.3E-10	1.2E-09	4.7E-10	6.7E-10	1.2E-09	4.7E-10	6.7E-10	1.2E-09	4.7E-10	6.7E-10	1.2E-09

7.3: BDCF^S für Valladolid - wärmeres Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	2.7E-06	3.0E-06	3.1E-06	2.7E-06	3.0E-06	3.2E-06	2.8E-06	3.1E-06	3.2E-06	2.7E-06	3.0E-06	3.1E-06
Am-243	7.6E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.7E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.8E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.6E-07	1.2E-06	1.6E-06
Cl-36	5.7E-05	2.8E-05	9.8E-06	6.2E-05	3.4E-05	1.3E-05	6.0E-05	3.2E-05	1.2E-05	6.0E-05	3.2E-05	1.2E-05
Cm-244	3.7E-07	4.5E-07	4.8E-07	3.7E-07	4.5E-07	4.8E-07	3.7E-07	4.5E-07	4.8E-07	3.7E-07	4.5E-07	4.8E-07
Cs-135	2.1E-08	2.1E-08	2.1E-08	6.9E-08	7.2E-08	5.2E-08	1.8E-08	1.7E-08	1.7E-08	1.9E-08	2.0E-08	1.9E-08
I-129	1.3E-06	1.6E-06	6.2E-07	1.3E-06	1.6E-06	6.1E-07	1.3E-06	1.6E-06	6.1E-07	1.3E-06	1.6E-06	6.1E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	3.6E-09	1.8E-09	8.0E-10	4.2E-09	1.8E-09	7.2E-10	5.9E-09	2.6E-09	1.1E-09	3.3E-09	1.5E-09	5.7E-10
Ni-63	8.8E-09	4.6E-09	1.8E-09	1.0E-08	4.6E-09	1.6E-09	1.4E-08	6.6E-09	2.6E-09	8.1E-09	3.8E-09	1.3E-09
Np-237	7.4E-07	8.3E-07	9.5E-07	7.3E-07	8.1E-07	9.2E-07	7.2E-07	8.0E-07	9.2E-07	7.6E-07	8.3E-07	9.4E-07
Pa-231	4.6E-06	7.9E-06	1.0E-05	4.6E-06	7.9E-06	1.0E-05	4.6E-06	7.9E-06	1.0E-05	4.6E-06	7.9E-06	1.0E-05
Pb-210	6.4E-06	5.2E-06	1.4E-06	1.2E-05	1.0E-05	4.1E-06	6.8E-06	6.1E-06	1.9E-06	7.1E-06	6.4E-06	2.1E-06
Pd-107	2.3E-09	1.0E-09	3.6E-10	2.3E-09	1.0E-09	3.6E-10	2.3E-09	1.0E-09	3.5E-10	2.3E-09	1.0E-09	3.6E-10
Po-210	5.5E-06	2.6E-06	1.1E-06	5.5E-06	2.6E-06	1.1E-06	5.5E-06	2.6E-06	1.1E-06	5.5E-06	2.6E-06	1.1E-06
Pu-239	5.6E-07	9.5E-07	1.3E-06	5.6E-07	9.5E-07	1.3E-06	5.6E-07	9.5E-07	1.3E-06	5.6E-07	9.6E-07	1.4E-06
Ra-226	7.0E-06	8.3E-06	4.0E-06	7.2E-06	8.7E-06	3.9E-06	5.2E-06	7.1E-06	3.5E-06	6.2E-06	7.3E-06	3.4E-06
Se-79	6.1E-07	3.8E-07	5.7E-08	6.1E-07	3.8E-07	5.7E-08	6.1E-07	3.8E-07	5.7E-08	6.1E-07	3.8E-07	5.7E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	8.7E-07	3.5E-07	1.0E-07	8.7E-07	3.5E-07	1.0E-07	8.7E-07	3.5E-07	1.0E-07	8.7E-07	3.5E-07	1.0E-07
Th-230	1.2E-06	1.4E-06	1.6E-06	1.1E-06	1.4E-06	1.6E-06	1.1E-06	1.4E-06	1.6E-06	1.1E-06	1.4E-06	1.5E-06
Th-232	1.0E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.1E-06	9.9E-07
U-238	4.4E-07	4.1E-07	2.8E-07	4.1E-07	3.8E-07	2.6E-07	3.6E-07	3.3E-07	2.1E-07	4.1E-07	3.8E-07	2.6E-07
Zr-93	3.8E-10	5.4E-10	1.0E-09	3.8E-10	5.4E-10	1.0E-09	3.8E-10	5.4E-10	1.0E-09	3.8E-10	5.4E-10	1.0E-09

7.4: BDCF^S für Santander – feuchteres Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.2E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07
Am-243	3.0E-07	3.8E-07	4.5E-07	3.0E-07	3.9E-07	4.6E-07	3.1E-07	3.9E-07	4.6E-07	3.0E-07	3.8E-07	4.6E-07
Cl-36	5.7E-05	2.8E-05	9.8E-06	6.1E-05	3.4E-05	1.3E-05	6.0E-05	3.2E-05	1.2E-05	5.9E-05	3.2E-05	1.2E-05
Cm-244	9.9E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.9E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.9E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.9E-08	1.1E-07	1.1E-07
Cs-135	6.8E-08	7.8E-08	6.1E-08	6.3E-08	7.1E-08	5.1E-08	6.1E-08	6.6E-08	4.6E-08	6.9E-08	8.4E-08	6.8E-08
I-129	1.5E-06	2.0E-06	8.7E-07	1.5E-06	1.9E-06	8.0E-07	1.5E-06	1.9E-06	8.0E-07	1.2E-06	1.6E-06	6.4E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	3.3E-09	1.7E-09	7.5E-10	3.9E-09	1.7E-09	6.7E-10	5.6E-09	2.5E-09	1.1E-09	2.9E-09	1.4E-09	5.2E-10
Ni-63	8.1E-09	4.3E-09	1.7E-09	9.6E-09	4.3E-09	1.5E-09	1.4E-08	6.3E-09	2.5E-09	7.1E-09	3.5E-09	1.2E-09
Np-237	5.3E-07	5.1E-07	4.7E-07	5.2E-07	4.9E-07	4.5E-07	5.2E-07	4.8E-07	4.4E-07	5.5E-07	5.1E-07	4.7E-07
Pa-231	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06
Pb-210	6.7E-06	5.9E-06	1.9E-06	6.4E-06	9.5E-06	3.8E-06	6.2E-06	5.5E-06	1.7E-06	6.0E-06	5.8E-06	1.8E-06
Pd-107	2.1E-09	9.4E-10	3.3E-10	2.1E-09	9.4E-10	3.3E-10	2.1E-09	9.4E-10	3.3E-10	1.9E-09	9.4E-10	3.3E-10
Po-210	4.0E-06	1.7E-06	6.5E-07	4.0E-06	1.7E-06	6.5E-07	4.0E-06	1.7E-06	6.5E-07	3.5E-06	1.7E-06	6.5E-07
Pu-239	1.5E-07	2.3E-07	3.0E-07	1.5E-07	2.3E-07	3.0E-07	1.5E-07	2.3E-07	3.0E-07	1.5E-07	2.4E-07	3.1E-07
Ra-226	6.6E-06	7.8E-06	3.8E-06	8.1E-06	8.2E-06	3.6E-06	4.7E-06	6.6E-06	3.2E-06	5.1E-06	6.7E-06	3.1E-06
Se-79	5.1E-07	3.2E-07	4.8E-08	5.1E-07	3.2E-07	4.8E-08	5.1E-07	3.2E-07	4.8E-08	4.0E-07	3.2E-07	4.8E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	2.0E-06	8.5E-07	4.4E-07	1.9E-06	1.3E-06	7.9E-07	2.5E-06	1.1E-06	6.1E-07	2.5E-06	1.1E-06	6.1E-07
Th-230	6.6E-07	6.6E-07	5.6E-07	6.6E-07	6.6E-07	5.6E-07	6.6E-07	6.6E-07	5.6E-07	5.9E-07	6.2E-07	5.2E-07
Th-232	6.8E-07	6.8E-07	4.7E-07	6.8E-07	6.8E-07	4.7E-07	6.8E-07	6.8E-07	4.7E-07	6.0E-07	6.4E-07	4.3E-07
U-238	3.5E-07	3.2E-07	2.0E-07	3.6E-07	3.0E-07	1.8E-07	2.8E-07	2.4E-07	1.3E-07	3.2E-07	2.9E-07	1.8E-07
Zr-93	2.6E-10	3.5E-10	6.1E-10	2.6E-10	3.5E-10	6.1E-10	2.6E-10	3.5E-10	6.1E-10	2.6E-10	3.5E-10	6.1E-10

7.5: BDCF^S für Rostow – trockeneres Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	2.7E-06	3.1E-06	3.2E-06	2.8E-06	3.1E-06	3.2E-06	2.9E-06	3.2E-06	3.3E-06	2.8E-06	3.1E-06	3.2E-06
Am-243	7.7E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.7E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.9E-07	1.2E-06	1.6E-06	7.7E-07	1.2E-06	1.6E-06
Cl-36	4.8E-05	2.5E-05	8.7E-06	5.4E-05	3.1E-05	1.2E-05	5.2E-05	2.8E-05	1.1E-05	5.2E-05	2.8E-05	1.1E-05
Cm-244	3.7E-07	4.6E-07	4.9E-07	3.7E-07	4.6E-07	4.9E-07	3.7E-07	4.6E-07	4.9E-07	3.7E-07	4.6E-07	4.9E-07
Cs-135	6.0E-08	6.9E-08	5.5E-08	5.5E-08	6.1E-08	4.5E-08	5.2E-08	5.6E-08	4.0E-08	6.6E-08	7.4E-08	6.1E-08
I-129	1.6E-06	2.1E-06	9.5E-07	1.5E-06	1.9E-06	8.5E-07	1.5E-06	1.9E-06	8.6E-07	1.1E-06	1.4E-06	5.7E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	3.3E-09	1.8E-09	8.4E-10	3.8E-09	1.7E-09	6.8E-10	5.5E-09	2.5E-09	1.1E-09	2.9E-09	1.3E-09	5.3E-10
Ni-63	8.1E-09	4.5E-09	1.9E-09	9.2E-09	4.2E-09	1.5E-09	1.4E-08	6.3E-09	2.6E-09	7.0E-09	3.3E-09	1.2E-09
Np-237	7.1E-07	8.2E-07	9.5E-07	6.9E-07	7.9E-07	9.1E-07	6.9E-07	7.8E-07	9.0E-07	7.6E-07	8.3E-07	9.5E-07
Pa-231	4.7E-06	8.0E-06	1.0E-05	4.7E-06	8.0E-06	1.0E-05	4.7E-06	8.0E-06	1.0E-05	4.7E-06	8.0E-06	1.0E-05
Pb-210	7.3E-06	6.9E-06	2.4E-06	1.0E-05	9.4E-06	3.8E-06	6.7E-06	6.5E-06	2.2E-06	6.9E-06	6.7E-06	2.3E-06
Pd-107	2.2E-09	1.0E-09	3.8E-10	2.2E-09	1.0E-09	3.8E-10	2.2E-09	1.0E-09	3.8E-10	2.2E-09	1.0E-09	3.8E-10
Po-210	5.6E-06	2.7E-06	1.2E-06	5.6E-06	2.7E-06	1.2E-06	5.6E-06	2.7E-06	1.2E-06	5.6E-06	2.7E-06	1.2E-06
Pu-239	5.6E-07	9.5E-07	1.3E-06	5.6E-07	9.5E-07	1.4E-06	5.6E-07	9.6E-07	1.4E-06	5.7E-07	9.7E-07	1.4E-06
Ra-226	6.6E-06	8.2E-06	4.0E-06	7.3E-06	9.3E-06	4.2E-06	5.4E-06	8.1E-06	3.9E-06	6.7E-06	8.2E-06	3.8E-06
Se-79	5.8E-07	3.6E-07	5.6E-08	5.8E-07	3.6E-07	5.6E-08	5.8E-07	3.6E-07	5.6E-08	5.8E-07	3.6E-07	5.6E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	1.6E-06	7.6E-07	3.9E-07	2.5E-06	1.1E-06	6.4E-07	2.1E-06	9.3E-07	5.2E-07	2.1E-06	9.4E-07	5.2E-07
Th-230	1.1E-06	1.4E-06	1.6E-06	1.1E-06	1.4E-06	1.6E-06	1.1E-06	1.4E-06	1.6E-06	1.1E-06	1.3E-06	1.5E-06
Th-232	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	9.6E-07	1.1E-06	1.0E-06
U-238	4.3E-07	4.1E-07	2.9E-07	4.2E-07	4.0E-07	2.8E-07	3.4E-07	3.1E-07	2.1E-07	3.8E-07	3.6E-07	2.6E-07
Zr-93	4.1E-10	5.9E-10	1.2E-09	4.1E-10	5.9E-10	1.2E-09	4.1E-10	5.9E-10	1.2E-09	4.1E-10	5.9E-10	1.2E-09

7.6: BDCF^S für Turku – Kälteres feuchtes Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.2E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07
Am-243	3.4E-07	4.1E-07	4.5E-07	3.0E-07	3.8E-07	4.6E-07	3.1E-07	3.9E-07	4.6E-07	3.0E-07	3.8E-07	4.5E-07
Cl-36	5.3E-05	2.3E-05	6.1E-06	6.5E-05	3.4E-05	1.3E-05	6.3E-05	3.2E-05	1.1E-05	6.3E-05	3.2E-05	1.1E-05
Cm-244	1.3E-06	9.0E-07	1.1E-07	9.5E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.5E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.5E-08	1.1E-07	1.1E-07
Cs-135	7.3E-08	8.1E-08	6.3E-08	8.9E-07	8.1E-07	7.9E-07	1.3E-07	1.2E-07	9.7E-08	3.3E-07	3.4E-07	3.3E-07
I-129	1.3E-06	1.7E-06	7.9E-07	1.5E-06	1.9E-06	7.2E-07	1.5E-06	1.9E-06	7.4E-07	1.3E-06	1.6E-06	5.8E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	4.0E-09	2.0E-09	8.4E-10	5.6E-09	2.3E-09	9.1E-10	8.8E-09	3.6E-09	1.5E-09	3.7E-09	1.7E-09	6.2E-10
Ni-63	9.9E-09	5.0E-09	1.9E-09	1.4E-08	5.8E-09	2.1E-09	2.2E-08	9.1E-09	3.6E-09	9.1E-09	4.1E-09	1.4E-09
Np-237	7.2E-07	6.5E-07	4.6E-07	5.2E-07	4.8E-07	4.3E-07	5.1E-07	4.8E-07	4.3E-07	5.5E-07	5.0E-07	4.5E-07
Pa-231	1.8E-06	2.3E-06	2.5E-06	1.7E-06	2.3E-06	2.5E-06	1.7E-06	2.3E-06	2.5E-06	1.7E-06	2.3E-06	2.5E-06
Pb-210	7.5E-06	6.3E-06	2.0E-06	9.9E-06	8.3E-06	2.9E-06	7.4E-06	6.2E-06	1.9E-06	7.5E-06	6.4E-06	1.9E-06
Pd-107	2.9E-09	1.2E-09	3.8E-10	2.6E-09	1.1E-09	3.8E-10	2.6E-09	1.1E-09	3.8E-10	2.6E-09	1.1E-09	3.8E-10
Po-210	6.8E-06	2.9E-06	9.0E-07	5.3E-06	2.3E-06	9.0E-07	5.3E-06	2.3E-06	9.0E-07	5.3E-06	2.3E-06	9.0E-07
Pu-239	1.5E-07	2.3E-07	2.9E-07	1.4E-07	2.2E-07	2.9E-07	1.4E-07	2.2E-07	2.9E-07	1.5E-07	2.3E-07	3.1E-07
Ra-226	7.4E-06	8.3E-06	3.7E-06	9.3E-06	1.0E-05	4.2E-06	5.5E-06	7.3E-06	3.4E-06	7.1E-06	8.0E-06	3.5E-06
Se-79	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	1.5E-06	6.9E-07	3.2E-07	2.2E-06	9.4E-07	5.0E-07	1.9E-06	8.2E-07	4.1E-07	1.9E-06	8.2E-07	4.1E-07
Th-230	8.9E-07	8.1E-07	6.4E-07	8.6E-07	7.9E-07	6.4E-07	8.6E-07	7.9E-07	6.4E-07	8.4E-07	7.5E-07	6.0E-07
Th-232	9.1E-07	8.6E-07	5.6E-07	8.9E-07	8.4E-07	5.6E-07	8.9E-07	8.4E-07	5.6E-07	8.7E-07	7.9E-07	5.1E-07
U-238	3.6E-07	3.2E-07	2.0E-07	3.7E-07	3.2E-07	1.9E-07	3.3E-07	2.7E-07	1.5E-07	3.6E-07	3.1E-07	1.8E-07
Zr-93	1.0E-09	1.1E-09	5.5E-10	2.5E-10	3.3E-10	5.5E-10	2.5E-10	3.3E-10	5.5E-10	2.5E-10	3.3E-10	5.5E-10

7.7: BDCF^S für Sodankylä – kälteres Klima

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07	1.1E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.2E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.1E-06	1.1E-06	9.9E-07
Am-243	3.4E-07	4.1E-07	4.5E-07	3.0E-07	3.8E-07	4.6E-07	3.1E-07	3.9E-07	4.6E-07	3.0E-07	3.8E-07	4.5E-07
Cl-36	5.3E-05	2.3E-05	6.1E-06	6.5E-05	3.4E-05	1.3E-05	6.3E-05	3.2E-05	1.1E-05	6.3E-05	3.2E-05	1.1E-05
Cm-244	1.3E-06	9.0E-07	1.1E-07	9.5E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.5E-08	1.1E-07	1.1E-07	9.5E-08	1.1E-07	1.1E-07
Cs-135	7.3E-08	8.1E-08	6.3E-08	8.9E-07	8.1E-07	7.9E-07	1.3E-07	1.2E-07	9.7E-08	3.3E-07	3.4E-07	3.3E-07
I-129	1.3E-06	1.7E-06	7.9E-07	1.5E-06	1.9E-06	7.2E-07	1.5E-06	1.9E-06	7.4E-07	1.3E-06	1.6E-06	5.8E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	4.0E-09	2.0E-09	8.4E-10	5.6E-09	2.3E-09	9.1E-10	8.8E-09	3.6E-09	1.5E-09	3.7E-09	1.7E-09	6.2E-10
Ni-63	9.9E-09	5.0E-09	1.9E-09	1.4E-08	5.8E-09	2.1E-09	2.2E-08	9.1E-09	3.6E-09	9.1E-09	4.1E-09	1.4E-09
Np-237	7.2E-07	6.5E-07	4.6E-07	5.2E-07	4.8E-07	4.3E-07	5.1E-07	4.8E-07	4.3E-07	5.5E-07	5.0E-07	4.5E-07
Pa-231	1.8E-06	2.3E-06	2.5E-06	1.7E-06	2.3E-06	2.5E-06	1.7E-06	2.3E-06	2.5E-06	1.7E-06	2.3E-06	2.5E-06
Pb-210	7.5E-06	6.3E-06	2.0E-06	9.9E-06	8.3E-06	2.9E-06	7.4E-06	6.2E-06	1.9E-06	7.5E-06	6.4E-06	1.9E-06
Pd-107	2.9E-09	1.2E-09	3.8E-10	2.6E-09	1.1E-09	3.8E-10	2.6E-09	1.1E-09	3.8E-10	2.6E-09	1.1E-09	3.8E-10
Po-210	6.8E-06	2.9E-06	9.0E-07	5.3E-06	2.3E-06	9.0E-07	5.3E-06	2.3E-06	9.0E-07	5.3E-06	2.3E-06	9.0E-07
Pu-239	1.5E-07	2.3E-07	2.9E-07	1.4E-07	2.2E-07	2.9E-07	1.4E-07	2.2E-07	2.9E-07	1.5E-07	2.3E-07	3.1E-07
Ra-226	7.4E-06	8.3E-06	3.7E-06	9.3E-06	1.0E-05	4.2E-06	5.5E-06	7.3E-06	3.4E-06	7.1E-06	8.0E-06	3.5E-06
Se-79	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08	8.7E-07	5.1E-07	7.8E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	1.5E-06	6.9E-07	3.2E-07	2.2E-06	9.4E-07	5.0E-07	1.9E-06	8.2E-07	4.1E-07	1.9E-06	8.2E-07	4.1E-07
Th-230	8.9E-07	8.1E-07	6.4E-07	8.6E-07	7.9E-07	6.4E-07	8.6E-07	7.9E-07	6.4E-07	8.4E-07	7.5E-07	6.0E-07
Th-232	9.1E-07	8.6E-07	5.6E-07	8.9E-07	8.4E-07	5.6E-07	8.9E-07	8.4E-07	5.6E-07	8.7E-07	7.9E-07	5.1E-07
U-238	3.6E-07	3.2E-07	2.0E-07	3.7E-07	3.2E-07	1.9E-07	3.3E-07	2.7E-07	1.5E-07	3.6E-07	3.1E-07	1.8E-07
Zr-93	1.0E-09	1.1E-09	5.5E-10	2.5E-10	3.3E-10	5.5E-10	2.5E-10	3.3E-10	5.5E-10	2.5E-10	3.3E-10	5.5E-10

7.8: BDCF^S für Vardo – Rentierszenario – kälteres trockenes Klima, Permafrost

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.1E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.1E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.1E-06	1.7E-06	1.8E-06	1.1E-06	1.7E-06	1.8E-06
Am-243	2.6E-07	3.4E-07	4.2E-07	2.6E-07	3.4E-07	4.2E-07	2.6E-07	3.4E-07	4.2E-07	2.6E-07	3.4E-07	4.2E-07
Cl-36	1.9E-07	9.1E-08	3.6E-08	1.5E-06	7.0E-07	3.4E-07	1.5E-06	7.0E-07	3.4E-07	1.5E-06	7.0E-07	3.4E-07
Cm-244	7.4E-08	9.2E-08	9.6E-08	7.4E-08	9.1E-08	9.5E-08	7.4E-08	9.1E-08	9.5E-08	7.4E-08	9.2E-08	9.5E-08
Cs-135	1.0E-08	1.9E-08	2.7E-08	9.4E-07	1.8E-06	2.6E-06	7.3E-08	1.4E-07	2.0E-07	2.8E-07	5.5E-07	7.9E-07
I-129	1.9E-07	4.2E-07	2.9E-07	2.0E-07	4.4E-07	3.1E-07	2.3E-07	5.1E-07	3.5E-07	2.0E-07	4.4E-07	3.1E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	9.5E-10	4.4E-10	2.5E-10	2.3E-09	1.0E-09	5.7E-10	4.6E-09	2.1E-09	1.1E-09	9.2E-10	4.2E-10	2.4E-10
Ni-63	2.3E-09	1.0E-09	5.1E-10	5.7E-09	2.6E-09	1.3E-09	1.1E-08	5.1E-09	2.6E-09	2.2E-09	9.9E-10	4.9E-10
Np-237	2.2E-07	2.5E-07	2.9E-07	2.2E-07	2.5E-07	2.9E-07	2.2E-07	2.5E-07	2.9E-07	2.2E-07	2.5E-07	2.9E-07
Pa-231	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06	1.4E-06	2.0E-06	2.3E-06
Pb-210	2.4E-06	2.2E-06	1.2E-06	2.4E-06	2.2E-06	8.5E-07	2.4E-06	2.2E-06	8.5E-07	2.4E-06	2.2E-06	8.5E-07
Pd-107	7.7E-10	2.5E-10	9.4E-11	7.7E-10	2.5E-10	9.4E-11	7.7E-10	2.5E-10	9.4E-11	7.7E-10	2.5E-10	9.4E-11
Po-210	6.8E-06	7.6E-06	4.6E-06	6.8E-06	7.6E-06	4.6E-06	6.8E-06	7.6E-06	4.6E-06	6.8E-06	7.6E-06	4.6E-06
Pu-239	1.1E-07	1.9E-07	2.6E-07	1.1E-07	1.9E-07	2.6E-07	1.1E-07	1.9E-07	2.6E-07	1.1E-07	1.9E-07	2.6E-07
Ra-226	4.2E-06	5.1E-06	2.8E-06	6.0E-06	7.5E-06	3.7E-06	2.8E-06	3.2E-06	2.1E-06	4.1E-06	4.9E-06	2.8E-06
Se-79	5.0E-07	2.8E-07	4.7E-08	5.0E-07	2.8E-07	4.7E-08	5.0E-07	2.8E-07	4.7E-08	5.0E-07	2.8E-07	4.7E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	1.7E-07	1.9E-07	1.3E-07	1.7E-07	1.9E-07	1.3E-07	1.7E-07	1.9E-07	1.3E-07	1.7E-07	1.9E-07	1.3E-07
Th-230	3.7E-07	3.5E-07	3.6E-07	3.7E-07	3.5E-07	3.6E-07	3.7E-07	3.5E-07	3.6E-07	3.7E-07	3.5E-07	3.6E-07
Th-232	3.6E-07	3.0E-07	2.5E-07	3.6E-07	3.0E-07	2.5E-07	3.6E-07	3.0E-07	2.5E-07	3.6E-07	3.0E-07	2.5E-07
U-238	1.0E-07	8.0E-08	5.8E-08	9.5E-08	7.4E-08	5.4E-08	1.1E-07	8.1E-08	5.8E-08	1.1E-07	8.1E-08	5.8E-08
Zr-93	4.4E-11	6.1E-11	1.1E-10	4.4E-11	6.1E-11	1.1E-10	4.4E-11	6.1E-11	1.1E-10	4.4E-11	6.1E-11	1.1E-10

7.9: BDCF^S für Elbe – Ernährung Durchschnittswert

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	8.5E-07	9.1E-07	9.0E-07	8.8E-07	9.6E-07	9.5E-07	9.4E-07	9.6E-07	9.4E-07	8.6E-07	9.1E-07	9.0E-07
Am-243	2.8E-07	3.6E-07	4.4E-07	2.8E-07	3.7E-07	4.5E-07	2.9E-07	3.7E-07	4.5E-07	2.8E-07	3.6E-07	4.4E-07
Cl-36	3.0E-05	1.8E-05	7.7E-06	3.7E-05	2.5E-05	1.2E-05	3.4E-05	2.2E-05	1.0E-05	3.4E-05	2.2E-05	1.0E-05
Cm-244	8.2E-08	1.0E-07	1.0E-07	8.2E-08	1.0E-07	1.0E-07	8.2E-08	1.0E-07	1.0E-07	8.2E-08	1.0E-07	1.0E-07
Cs-135	3.5E-08	4.5E-08	4.1E-08	3.1E-08	3.7E-08	3.0E-08	2.9E-08	3.3E-08	2.5E-08	4.1E-08	5.0E-08	4.7E-08
I-129	8.2E-07	1.1E-06	5.5E-07	7.7E-07	1.0E-06	4.6E-07	7.8E-07	1.0E-06	4.7E-07	5.9E-07	8.1E-07	3.4E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	2.0E-09	1.2E-09	6.0E-10	2.3E-09	1.0E-09	4.3E-10	3.6E-09	1.7E-09	8.2E-10	1.6E-09	7.7E-10	3.2E-10
Ni-63	4.8E-09	2.9E-09	1.4E-09	5.5E-09	2.5E-09	9.5E-10	8.9E-09	4.3E-09	1.9E-09	3.9E-09	1.9E-09	6.8E-10
Np-237	3.8E-07	3.9E-07	4.0E-07	3.6E-07	3.6E-07	3.7E-07	3.5E-07	3.5E-07	3.6E-07	3.8E-07	3.8E-07	3.8E-07
Pa-231	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06
Pb-210	4.3E-06	4.4E-06	1.5E-06	5.7E-06	5.5E-06	2.1E-06	4.0E-06	4.2E-06	1.5E-06	4.1E-06	4.3E-06	1.5E-06
Pd-107	1.3E-09	6.6E-10	2.6E-10	1.3E-09	6.6E-10	2.6E-10	1.3E-09	6.6E-10	2.6E-10	1.3E-09	6.6E-10	2.6E-10
Po-210	2.5E-06	1.1E-06	4.5E-07	2.5E-06	1.1E-06	4.5E-07	2.5E-06	1.1E-06	4.5E-07	2.5E-06	1.1E-06	4.5E-07
Pu-239	1.2E-07	2.1E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.1E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.1E-07	2.8E-07	1.3E-07	2.2E-07	3.0E-07
Ra-226	4.5E-06	5.6E-06	3.0E-06	5.3E-06	6.9E-06	3.4E-06	4.0E-06	6.3E-06	3.3E-06	4.5E-06	5.6E-06	2.9E-06
Se-79	3.4E-07	2.2E-07	3.5E-08	3.4E-07	2.2E-07	3.5E-08	3.4E-07	2.2E-07	3.5E-08	3.4E-07	2.2E-07	3.5E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	9.1E-07	4.6E-07	2.4E-07	1.3E-06	6.2E-07	3.5E-07	1.1E-06	5.4E-07	2.9E-07	1.1E-06	5.4E-07	2.9E-07
Th-230	4.5E-07	5.1E-07	4.9E-07	4.5E-07	5.1E-07	4.9E-07	4.5E-07	5.1E-07	4.9E-07	4.2E-07	4.5E-07	4.3E-07
Th-232	4.4E-07	5.0E-07	4.0E-07	4.4E-07	5.0E-07	4.0E-07	4.4E-07	5.0E-07	4.0E-07	4.1E-07	4.3E-07	3.3E-07
U-238	2.2E-07	2.2E-07	1.5E-07	2.1E-07	2.1E-07	1.4E-07	1.7E-07	1.5E-07	9.9E-08	1.9E-07	1.8E-07	1.3E-07
Zr-93	1.6E-10	2.4E-10	4.6E-10	1.6E-10	2.4E-10	4.6E-10	1.6E-10	2.4E-10	4.6E-10	1.6E-10	2.4E-10	4.6E-10

7.10: BDCF^S für Elbe - Ernährung 95 Perzentil

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.4E-06	1.3E-06	1.2E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.3E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.3E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.2E-06
Am-243	3.4E-07	4.2E-07	4.9E-07	3.5E-07	4.4E-07	5.1E-07	3.5E-07	4.5E-07	5.1E-07	3.4E-07	4.2E-07	4.9E-07
Cl-36	8.4E-05	4.6E-05	1.8E-05	9.7E-05	6.1E-05	2.7E-05	9.1E-05	5.4E-05	2.3E-05	9.2E-05	5.4E-05	2.3E-05
Cm-244	1.3E-07	1.4E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.4E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.4E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.4E-07	1.3E-07
Cs-135	1.0E-07	1.2E-07	1.0E-07	9.1E-08	1.0E-07	8.0E-08	8.4E-08	9.5E-08	6.8E-08	1.2E-07	1.4E-07	1.2E-07
I-129	2.4E-06	3.2E-06	1.5E-06	2.3E-06	3.0E-06	1.3E-06	2.0E-06	3.0E-06	1.3E-06	1.7E-06	2.3E-06	9.3E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	5.4E-09	3.0E-09	1.4E-09	6.6E-09	2.9E-09	1.2E-09	1.0E-08	4.6E-09	2.1E-09	4.6E-09	2.1E-09	8.3E-10
Ni-63	1.3E-08	7.5E-09	3.2E-09	1.6E-08	7.2E-09	2.7E-09	2.6E-08	1.2E-08	4.9E-09	1.1E-08	5.4E-09	1.9E-09
Np-237	6.8E-07	6.6E-07	6.0E-07	6.5E-07	5.9E-07	5.3E-07	6.2E-07	5.8E-07	5.1E-07	7.3E-07	6.5E-07	5.8E-07
Pa-231	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06
Pb-210	1.1E-05	1.1E-05	3.6E-06	1.6E-05	1.4E-05	5.4E-06	1.1E-05	1.0E-05	3.3E-06	1.1E-05	1.0E-05	3.5E-06
Pd-107	3.5E-09	1.7E-09	6.3E-10	3.5E-09	1.7E-09	6.3E-10	3.5E-09	1.7E-09	6.3E-10	3.5E-09	1.7E-09	6.3E-10
Po-210	7.1E-06	3.0E-06	1.2E-06	7.1E-06	3.0E-06	1.2E-06	6.7E-06	3.0E-06	1.2E-06	7.1E-06	3.0E-06	1.2E-06
Pu-239	1.8E-07	2.7E-07	3.4E-07	1.8E-07	2.7E-07	3.4E-07	1.8E-07	2.7E-07	3.4E-07	2.0E-07	3.0E-07	3.7E-07
Ra-226	9.8E-06	1.2E-05	5.2E-06	1.2E-05	1.5E-05	5.8E-06	7.6E-06	1.2E-05	5.3E-06	9.7E-06	1.2E-05	4.9E-06
Se-79	1.0E-06	6.2E-07	9.8E-08	1.0E-06	6.2E-07	9.8E-08	1.0E-06	6.2E-07	9.8E-08	1.0E-06	6.2E-07	9.8E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	2.5E-06	1.2E-06	6.0E-07	3.7E-06	1.7E-06	9.4E-07	3.1E-06	1.4E-06	7.7E-07	3.1E-06	1.4E-06	7.8E-07
Th-230	1.1E-06	1.1E-06	8.6E-07	1.1E-06	1.1E-06	8.6E-07	1.1E-06	1.1E-06	8.6E-07	1.0E-06	9.5E-07	7.5E-07
Th-232	1.1E-06	1.2E-06	8.1E-07	1.1E-06	1.2E-06	8.0E-07	1.1E-06	1.2E-06	8.0E-07	1.1E-06	1.0E-06	6.8E-07
U-238	5.6E-07	5.2E-07	3.3E-07	5.4E-07	5.0E-07	3.1E-07	4.2E-07	3.7E-07	2.1E-07	4.9E-07	4.5E-07	2.8E-07
Zr-93	4.4E-10	6.0E-10	1.1E-09	4.4E-10	6.0E-10	1.1E-09	3.9E-10	6.0E-10	1.1E-09	4.4E-10	6.0E-10	1.1E-09

7.11: BDCF^S für Elbe – Sonderszenarien erwachsene Vegetarier und historische Ernährung Deutschland um 1900

Sv/a pro Bq/kg	Sand		Lehm		Ton		Organische Böden	
	Vegetarier	1900	Vegetarier	1900	Vegetarier	1900	Vegetarier	1900
Ac-227	9.6E-07	1.0E-06	1.0E-06	1.1E-06	1.0E-06	1.2E-06	9.6E-07	1.0E-06
Am-243	4.5E-07	4.6E-07	4.6E-07	4.7E-07	4.6E-07	4.9E-07	4.5E-07	4.6E-07
Cl-36	6.9E-06	6.6E-06	9.8E-06	9.7E-06	8.6E-06	8.3E-06	8.5E-06	8.6E-06
Cm-244	1.1E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.2E-07
Cs-135	4.0E-08	4.3E-08	3.2E-08	3.1E-08	2.8E-08	2.6E-08	4.4E-08	4.6E-08
I-129	6.3E-07	9.5E-07	5.4E-07	8.7E-07	5.4E-07	8.8E-07	3.6E-07	3.9E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	6.5E-10	6.1E-10	4.8E-10	4.6E-10	8.6E-10	8.2E-10	3.7E-10	3.5E-10
Ni-63	1.5E-09	1.4E-09	1.1E-09	1.0E-09	2.0E-09	1.9E-09	7.9E-10	7.4E-10
Np-237	4.4E-07	4.4E-07	4.0E-07	4.0E-07	3.8E-07	3.9E-07	4.2E-07	4.8E-07
Pa-231	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06
Pb-210	1.9E-06	1.8E-06	2.8E-06	2.4E-06	1.8E-06	1.6E-06	1.8E-06	1.6E-06
Pd-107	2.9E-10	2.7E-10	2.9E-10	2.7E-10	2.9E-10	2.7E-10	2.9E-10	2.7E-10
Po-210	5.4E-07	6.7E-07	5.4E-07	6.7E-07	5.4E-07	6.7E-07	5.4E-07	6.7E-07
Pu-239	2.9E-07	3.1E-07	3.0E-07	3.1E-07	3.0E-07	3.1E-07	3.2E-07	3.3E-07
Ra-226	3.3E-06	3.2E-06	3.6E-06	3.5E-06	3.6E-06	3.3E-06	3.1E-06	3.6E-06
Se-79	3.7E-08	3.6E-08	3.7E-08	3.6E-08	3.7E-08	3.6E-08	3.7E-08	3.6E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	3.1E-07	2.6E-07	4.9E-07	3.9E-07	4.0E-07	3.3E-07	4.0E-07	3.3E-07
Th-230	5.4E-07	5.1E-07	5.4E-07	5.1E-07	5.4E-07	5.1E-07	4.7E-07	4.6E-07
Th-232	4.5E-07	4.2E-07	4.5E-07	4.2E-07	4.5E-07	4.2E-07	3.8E-07	3.6E-07
U-238	1.8E-07	1.9E-07	1.7E-07	1.9E-07	1.1E-07	1.1E-07	1.5E-07	1.4E-07
Zr-93	5.9E-10	7.2E-10	5.9E-10	7.2E-10	5.9E-10	7.2E-10	5.9E-10	7.2E-10

7.12: BDCF^S für Weser/Aller - Ernährung Durchschnittswert

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	8.0E-07	8.6E-07	8.7E-07	8.3E-07	9.1E-07	9.1E-07	8.7E-07	9.1E-07	9.1E-07	8.1E-07	8.7E-07	8.7E-07
Am-243	2.7E-07	3.5E-07	4.3E-07	2.7E-07	3.6E-07	4.4E-07	2.8E-07	3.6E-07	4.4E-07	2.7E-07	3.5E-07	4.3E-07
Cl-36	2.5E-05	1.5E-05	6.1E-06	3.0E-05	2.0E-05	9.3E-06	2.8E-05	1.8E-05	7.8E-06	2.8E-05	1.8E-05	7.9E-06
Cm-244	7.9E-08	9.6E-08	1.0E-07	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07
Cs-135	3.0E-08	3.7E-08	3.3E-08	2.6E-08	3.1E-08	2.4E-08	2.4E-08	2.7E-08	2.0E-08	3.5E-08	4.2E-08	3.9E-08
I-129	6.9E-07	9.5E-07	4.5E-07	6.5E-07	8.5E-07	3.8E-07	6.6E-07	8.6E-07	3.9E-07	5.0E-07	6.8E-07	2.8E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	1.7E-09	1.0E-09	5.1E-10	2.1E-09	9.1E-10	3.9E-10	3.4E-09	1.6E-09	7.3E-10	1.4E-09	6.7E-10	2.8E-10
Ni-63	4.2E-09	2.4E-09	1.1E-09	5.1E-09	2.2E-09	8.5E-10	8.4E-09	3.9E-09	1.7E-09	3.4E-09	1.6E-09	5.9E-10
Np-237	3.5E-07	3.7E-07	3.8E-07	3.3E-07	3.4E-07	3.5E-07	3.3E-07	3.3E-07	3.4E-07	3.5E-07	3.5E-07	3.6E-07
Pa-231	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06
Pb-210	3.7E-06	3.7E-06	1.3E-06	5.0E-06	4.8E-06	1.9E-06	3.5E-06	3.6E-06	1.2E-06	3.6E-06	3.6E-06	1.3E-06
Pd-107	1.1E-09	5.6E-10	2.2E-10	1.1E-09	5.6E-10	2.2E-10	1.1E-09	5.6E-10	2.2E-10	1.1E-09	5.6E-10	2.2E-10
Po-210	2.2E-06	9.6E-07	3.9E-07	2.2E-06	9.7E-07	3.9E-07	2.2E-06	9.7E-07	3.9E-07	2.2E-06	9.7E-07	3.9E-07
Pu-239	1.2E-07	2.0E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.0E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.0E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.1E-07	2.9E-07
Ra-226	4.2E-06	5.1E-06	2.8E-06	5.0E-06	6.3E-06	3.1E-06	3.7E-06	5.5E-06	3.0E-06	4.2E-06	5.0E-06	2.7E-06
Se-79	3.3E-07	2.0E-07	3.3E-08	3.3E-07	2.0E-07	3.3E-08	3.3E-07	2.0E-07	3.3E-08	3.3E-07	2.0E-07	3.3E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	7.8E-07	3.9E-07	2.0E-07	1.1E-06	5.3E-07	3.0E-07	9.6E-07	4.6E-07	2.5E-07	9.6E-07	4.6E-07	2.5E-07
Th-230	4.1E-07	4.6E-07	4.6E-07	4.1E-07	4.6E-07	4.6E-07	4.1E-07	4.6E-07	4.6E-07	3.9E-07	4.2E-07	4.1E-07
Th-232	4.0E-07	4.4E-07	3.6E-07	4.0E-07	4.5E-07	3.6E-07	4.0E-07	4.4E-07	3.6E-07	3.8E-07	3.9E-07	3.1E-07
U-238	1.9E-07	1.9E-07	1.3E-07	1.8E-07	1.8E-07	1.2E-07	1.5E-07	1.4E-07	8.9E-08	1.7E-07	1.6E-07	1.1E-07
Zr-93	1.4E-10	2.0E-10	4.0E-10	1.4E-10	2.1E-10	3.9E-10	1.4E-10	2.1E-10	3.9E-10	1.4E-10	2.1E-10	4.0E-10

7.13: BDCF^S für Weser/Aller - Ernährung 95 Perzentil

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.2E-06	1.2E-06	1.1E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.2E-06	1.5E-06	1.4E-06	1.2E-06	1.3E-06	1.2E-06	1.1E-06
Am-243	3.2E-07	4.0E-07	4.8E-07	3.3E-07	4.2E-07	4.9E-07	3.5E-07	4.3E-07	5.0E-07	3.3E-07	4.1E-07	4.8E-07
Cl-36	7.0E-05	3.8E-05	1.4E-05	8.0E-05	4.9E-05	2.1E-05	7.6E-05	4.4E-05	1.8E-05	7.6E-05	4.4E-05	1.8E-05
Cm-244	1.1E-07	1.3E-07	1.3E-07	1.1E-07	1.3E-07	1.3E-07	1.1E-07	1.3E-07	1.3E-07	1.1E-07	1.3E-07	1.3E-07
Cs-135	8.9E-08	1.0E-07	8.6E-08	7.7E-08	8.6E-08	6.6E-08	7.1E-08	7.9E-08	5.6E-08	1.0E-07	1.1E-07	9.9E-08
I-129	2.9E-06	2.7E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.5E-06	1.1E-06	2.0E-06	2.5E-06	1.1E-06	1.5E-06	1.9E-06	7.8E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	4.8E-09	2.5E-09	1.2E-09	6.1E-09	2.6E-09	1.0E-09	9.8E-09	4.2E-09	1.9E-09	4.1E-09	1.9E-09	7.2E-10
Ni-63	1.2E-08	6.3E-09	2.7E-09	1.5E-08	6.5E-09	2.4E-09	2.4E-08	1.1E-08	4.4E-09	1.0E-08	4.6E-09	1.6E-09
Np-237	7.6E-07	5.9E-07	5.5E-07	5.8E-07	5.4E-07	4.9E-07	5.7E-07	5.2E-07	4.7E-07	6.4E-07	5.8E-07	5.3E-07
Pa-231	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06
Pb-210	1.2E-05	9.2E-06	3.1E-06	1.4E-05	1.2E-05	4.8E-06	9.3E-06	8.8E-06	2.9E-06	9.7E-06	9.0E-06	3.0E-06
Pd-107	3.2E-09	1.4E-09	5.4E-10	3.1E-09	1.5E-09	5.4E-10	3.1E-09	1.5E-09	5.4E-10	3.1E-09	1.5E-09	5.4E-10
Po-210	6.3E-06	2.7E-06	1.0E-06	6.4E-06	2.7E-06	1.0E-06	6.4E-06	2.7E-06	1.0E-06	6.4E-06	2.7E-06	1.0E-06
Pu-239	1.6E-07	2.5E-07	3.3E-07	1.7E-07	2.5E-07	3.3E-07	1.7E-07	2.6E-07	3.3E-07	1.8E-07	2.8E-07	3.5E-07
Ra-226	9.1E-06	1.1E-05	4.8E-06	1.1E-05	1.4E-05	5.4E-06	6.9E-06	1.1E-05	4.7E-06	8.9E-06	1.1E-05	4.4E-06
Se-79	9.6E-07	5.8E-07	9.2E-08	9.6E-07	5.8E-07	9.2E-08	9.6E-07	5.8E-07	9.2E-08	9.6E-07	5.8E-07	9.2E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	2.2E-06	1.0E-06	5.2E-07	3.2E-06	1.5E-06	8.3E-07	2.7E-06	1.2E-06	6.8E-07	2.7E-06	1.2E-06	6.8E-07
Th-230	9.9E-07	9.5E-07	7.9E-07	9.9E-07	9.5E-07	7.9E-07	9.9E-07	9.5E-07	7.9E-07	9.5E-07	8.6E-07	7.0E-07
Th-232	1.0E-06	1.0E-06	7.2E-07	1.0E-06	1.0E-06	7.2E-07	1.0E-06	1.0E-06	7.2E-07	9.9E-07	9.3E-07	6.2E-07
U-238	5.8E-07	4.5E-07	2.9E-07	4.7E-07	4.3E-07	2.7E-07	3.8E-07	3.3E-07	1.9E-07	4.4E-07	3.9E-07	2.4E-07
Zr-93	4.8E-10	5.1E-10	9.2E-10	3.7E-10	5.1E-10	9.2E-10	3.7E-10	5.1E-10	9.2E-10	3.7E-10	5.1E-10	9.2E-10

7.14: BDCF^S für Donau - Ernährung Durchschnittswert

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	8.0E-07	8.6E-07	8.7E-07	8.2E-07	9.0E-07	9.0E-07	8.6E-07	9.0E-07	8.9E-07	8.0E-07	8.6E-07	8.7E-07
Am-243	2.7E-07	3.5E-07	4.3E-07	2.7E-07	3.6E-07	4.4E-07	2.8E-07	3.6E-07	4.4E-07	2.7E-07	3.5E-07	4.3E-07
Cl-36	2.5E-05	1.5E-05	5.8E-06	3.0E-05	2.0E-05	9.4E-06	2.8E-05	1.7E-05	7.6E-06	2.8E-05	1.7E-05	7.5E-06
Cm-244	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07	7.8E-08	9.6E-08	1.0E-07
Cs-135	3.0E-08	3.7E-08	3.2E-08	2.7E-08	3.1E-08	2.7E-08	2.5E-08	2.8E-08	2.0E-08	3.5E-08	4.2E-08	3.8E-08
I-129	6.8E-07	9.3E-07	4.3E-07	6.4E-07	8.5E-07	3.8E-07	6.5E-07	8.6E-07	3.8E-07	5.2E-07	7.0E-07	2.9E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	1.7E-09	9.8E-10	4.8E-10	2.1E-09	9.3E-10	2.6E-10	3.4E-09	1.5E-09	7.2E-10	1.4E-09	6.8E-10	2.8E-10
Ni-63	4.2E-09	2.4E-09	1.1E-09	5.2E-09	2.3E-09	5.4E-10	8.4E-09	3.8E-09	1.6E-09	3.5E-09	1.6E-09	5.9E-10
Np-237	3.5E-07	3.7E-07	3.8E-07	3.4E-07	3.4E-07	3.6E-07	3.3E-07	3.4E-07	3.4E-07	3.5E-07	3.5E-07	3.6E-07
Pa-231	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.1E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.2E-06
Pb-210	3.7E-06	3.6E-06	1.2E-06	5.3E-06	4.9E-06	1.8E-06	3.4E-06	3.4E-06	1.2E-06	3.6E-06	3.5E-06	1.2E-06
Pd-107	1.1E-09	5.5E-10	2.1E-10	1.1E-09	5.5E-10	1.9E-10	1.1E-09	5.5E-10	2.1E-10	1.1E-09	5.5E-10	2.1E-10
Po-210	2.2E-06	9.5E-07	3.8E-07	2.2E-06	9.5E-07	3.0E-07	2.2E-06	9.5E-07	3.8E-07	2.2E-06	9.5E-07	3.8E-07
Pu-239	1.2E-07	2.0E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.0E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.0E-07	2.8E-07	1.2E-07	2.1E-07	2.9E-07
Ra-226	4.3E-06	5.1E-06	2.8E-06	5.0E-06	6.1E-06	2.6E-06	3.6E-06	5.3E-06	2.9E-06	4.1E-06	4.9E-06	2.6E-06
Se-79	3.3E-07	2.1E-07	3.3E-08	3.3E-07	2.1E-07	1.3E-08	3.3E-07	2.1E-07	3.3E-08	3.3E-07	2.1E-07	3.3E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	8.3E-07	4.0E-07	2.1E-07	1.3E-06	5.7E-07	3.4E-07	1.0E-06	4.8E-07	2.7E-07	1.0E-06	4.9E-07	2.7E-07
Th-230	4.2E-07	4.6E-07	4.5E-07	4.1E-07	4.6E-07	4.1E-07	4.1E-07	4.6E-07	4.5E-07	3.9E-07	4.2E-07	4.1E-07
Th-232	4.1E-07	4.4E-07	3.5E-07	4.0E-07	4.4E-07	3.0E-07	4.0E-07	4.4E-07	3.5E-07	3.8E-07	3.9E-07	3.1E-07
U-238	1.9E-07	1.9E-07	1.3E-07	1.8E-07	1.7E-07	1.1E-07	1.5E-07	1.4E-07	8.9E-08	1.7E-07	1.6E-07	1.1E-07
Zr-93	1.3E-10	2.0E-10	3.8E-10	1.3E-10	2.0E-10	3.8E-10	1.3E-10	2.0E-10	3.8E-10	1.3E-10	2.0E-10	3.8E-10

7.15: BDCF^S für Donau - Ernährung 95 Perzentil

Sv/a pro Bq/kg	Sand			Lehm			Ton			Organische Böden		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Ac-227	1.2E-06	1.2E-06	1.1E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.2E-06	1.4E-06	1.3E-06	1.2E-06	1.3E-06	1.2E-06	1.1E-06
Am-243	3.2E-07	4.0E-07	4.8E-07	3.3E-07	4.2E-07	4.9E-07	3.4E-07	4.2E-07	4.9E-07	3.3E-07	4.1E-07	4.8E-07
Cl-36	7.1E-05	3.8E-05	1.4E-05	8.0E-05	4.8E-05	2.2E-05	7.6E-05	4.4E-05	1.8E-05	7.7E-05	4.3E-05	1.7E-05
Cm-244	1.1E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.3E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.3E-07	1.2E-07
Cs-135	8.7E-08	1.0E-07	8.5E-08	7.9E-08	8.8E-08	7.8E-08	7.4E-08	8.1E-08	5.7E-08	1.0E-07	1.2E-07	9.8E-08
I-129	2.0E-06	2.6E-06	1.2E-06	1.9E-06	2.5E-06	1.1E-06	1.9E-06	2.5E-06	1.1E-06	1.5E-06	2.0E-06	8.1E-07
Nb-94	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	4.8E-09	2.5E-09	1.1E-09	6.2E-09	2.6E-09	1.1E-09	1.0E-08	4.2E-09	1.9E-09	4.2E-09	1.9E-09	7.3E-10
Ni-63	1.2E-08	6.3E-09	2.6E-09	1.5E-08	6.6E-09	2.7E-09	2.5E-08	1.1E-08	4.4E-09	1.0E-08	4.8E-09	1.7E-09
Np-237	6.1E-07	5.9E-07	5.5E-07	5.9E-07	5.4E-07	5.2E-07	5.8E-07	5.3E-07	4.8E-07	6.4E-07	5.8E-07	5.2E-07
Pa-231	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06	1.9E-06	2.5E-06	2.6E-06
Pb-210	1.0E-05	9.1E-06	3.0E-06	1.5E-05	1.3E-05	5.1E-06	9.4E-06	8.6E-06	2.8E-06	9.7E-06	8.9E-06	2.9E-06
Pd-107	3.1E-09	1.4E-09	5.2E-10	3.1E-09	1.4E-09	5.6E-10	3.1E-09	1.4E-09	5.2E-10	3.1E-09	1.4E-09	5.2E-10
Po-210	6.4E-06	2.7E-06	1.0E-06	6.4E-06	2.6E-06	1.1E-06	6.4E-06	2.6E-06	1.0E-06	6.4E-06	2.6E-06	1.0E-06
Pu-239	1.6E-07	2.5E-07	3.2E-07	1.7E-07	2.5E-07	3.2E-07	1.7E-07	2.5E-07	3.2E-07	1.8E-07	2.8E-07	3.5E-07
Ra-226	9.3E-06	1.1E-05	4.8E-06	1.1E-05	1.3E-05	5.3E-06	6.8E-06	1.0E-05	4.5E-06	8.7E-06	1.0E-05	4.2E-06
Se-79	9.8E-07	6.0E-07	9.2E-08	9.8E-07	5.9E-07	9.6E-08	9.8E-07	5.9E-07	9.2E-08	9.8E-07	5.9E-07	9.2E-08
Sn-126	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
Tc-99	2.3E-06	1.1E-06	5.5E-07	3.6E-06	1.6E-06	9.4E-07	3.0E-06	1.3E-06	7.3E-07	3.0E-06	1.3E-06	7.4E-07
Th-230	1.0E-06	9.5E-07	7.8E-07	1.0E-06	9.5E-07	8.1E-07	1.0E-06	9.4E-07	7.7E-07	9.6E-07	8.7E-07	6.9E-07
Th-232	1.0E-06	1.0E-06	7.1E-07	1.0E-06	1.0E-06	7.4E-07	1.0E-06	1.0E-06	7.1E-07	1.0E-06	9.3E-07	6.2E-07
U-238	4.9E-07	4.5E-07	2.9E-07	4.6E-07	4.2E-07	2.7E-07	3.9E-07	3.3E-07	1.9E-07	4.5E-07	4.0E-07	2.5E-07
Zr-93	3.5E-10	4.9E-10	8.8E-10	3.5E-10	4.9E-10	9.0E-10	3.5E-10	4.9E-10	8.8E-10	3.5E-10	4.9E-10	8.7E-10

7.16: BDCF^W für subtropische Referenzklimaregionen Marrakesch, Rom und Valladolid

Sv/a pro Bq/l	Marrakesch			Rom			Valladolid		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
C-14	1.6E-07	8.5E-08	6.5E-08	1.9E-07	9.8E-08	7.4E-08	1.8E-07	9.3E-08	7.0E-08
Ac-227	1.7E-03	1.7E-03	2.0E-03	1.3E-03	9.7E-04	1.4E-03	1.2E-03	9.3E-04	1.4E-03
Am-243	2.0E-04	2.5E-04	3.7E-04	1.5E-04	1.4E-04	2.6E-04	1.4E-04	1.3E-04	2.5E-04
Cl-36	1.1E-05	8.0E-06	4.9E-06	1.3E-05	5.6E-06	3.1E-06	1.3E-05	5.8E-06	3.3E-06
Cm-244	1.6E-04	1.6E-04	2.2E-04	1.2E-04	8.9E-05	1.5E-04	1.1E-04	8.5E-05	1.5E-04
Cs-135	5.5E-06	1.1E-05	1.6E-05	4.4E-06	5.5E-06	8.2E-06	4.3E-06	6.0E-06	9.2E-06
I-129	3.3E-04	7.4E-04	5.5E-04	2.1E-04	2.9E-04	2.3E-04	1.9E-04	2.7E-04	2.2E-04
Nb-94	6.1E-06	4.1E-06	3.3E-06	8.8E-06	4.0E-06	2.9E-06	9.0E-06	4.0E-06	2.9E-06
Ni-59	1.6E-06	1.4E-06	9.4E-07	1.2E-06	5.7E-07	3.4E-07	1.1E-06	5.7E-07	3.4E-07
Ni-63	3.9E-06	3.6E-06	2.2E-06	2.9E-06	1.5E-06	8.0E-07	2.8E-06	1.5E-06	8.2E-07
Np-237	1.1E-04	1.2E-04	2.0E-04	8.4E-05	7.0E-05	1.4E-04	8.0E-05	6.8E-05	1.4E-04
Pa-231	8.2E-04	1.1E-03	1.4E-03	1.2E-03	1.1E-03	1.2E-03	1.2E-03	1.1E-03	1.2E-03
Pb-210	2.0E-03	2.2E-03	1.3E-03	1.7E-03	1.4E-03	9.6E-04	1.7E-03	1.4E-03	9.5E-04
Pd-107	1.3E-06	1.0E-06	5.5E-07	9.8E-07	4.2E-07	2.0E-07	9.3E-07	4.2E-07	2.0E-07
Po-210	4.9E-03	3.0E-03	2.3E-03	4.0E-03	1.9E-03	1.6E-03	3.9E-03	1.8E-03	1.6E-03
Pu-239	2.3E-04	3.0E-04	4.6E-04	1.7E-04	1.7E-04	3.2E-04	1.6E-04	1.6E-04	3.1E-04
Ra-226	6.1E-04	9.8E-04	5.4E-04	8.9E-04	9.7E-04	5.0E-04	9.2E-04	1.0E-03	5.0E-04
Se-79	5.8E-05	6.5E-05	1.6E-05	1.1E-04	6.8E-05	1.4E-05	1.1E-04	6.8E-05	1.4E-05
Sn-126	7.0E-05	6.2E-05	3.6E-05	5.3E-05	2.7E-05	1.7E-05	5.0E-05	2.7E-05	1.7E-05
Tc-99	7.0E-06	5.0E-06	3.2E-06	3.5E-06	1.7E-06	1.2E-06	3.1E-06	1.5E-06	1.1E-06
Th-230	2.5E-04	2.8E-04	4.0E-04	3.0E-04	2.4E-04	3.3E-04	3.0E-04	2.4E-04	3.3E-04
Th-232	2.7E-04	3.4E-04	4.4E-04	3.3E-04	2.9E-04	3.6E-04	3.3E-04	2.9E-04	3.6E-04
U-238	7.6E-05	8.3E-05	9.3E-05	1.1E-04	7.9E-05	8.2E-05	1.1E-04	8.1E-05	8.2E-05
Zr-93	4.1E-07	6.5E-07	2.0E-06	3.4E-07	4.1E-07	1.5E-06	3.3E-07	4.1E-07	1.5E-06

7.17: BDCF^W für Referenzklimaregion Elbe

Sv/a pro Bq/l	Kleinkind		Kind		Erwachsener		Vegetarier	1900
	Durchschnitt	95%	Durchschnitt	95%	Durchschnitt	95%		
C-14	6.9E-08	1.4E-07	3.6E-08	7.0E-08	2.8E-08	5.2E-08	2.8E-08	2.4E-08
Ac-227	7.2E-04	1.5E-03	5.4E-04	1.1E-03	8.6E-04	1.8E-03	8.7E-04	8.5E-04
Am-243	8.5E-05	1.8E-04	7.8E-05	1.6E-04	1.6E-04	3.2E-04	1.6E-04	1.5E-04
Cl-36	5.1E-06	1.4E-05	2.3E-06	5.8E-06	1.5E-06	3.5E-06	1.2E-06	1.3E-06
Cm-244	6.7E-05	1.4E-04	5.0E-05	1.0E-04	9.4E-05	1.9E-04	9.5E-05	9.3E-05
Cs-135	1.6E-06	5.0E-06	2.3E-06	6.2E-06	4.0E-06	1.1E-05	2.5E-06	3.3E-06
I-129	8.0E-05	1.9E-04	1.1E-04	2.6E-04	1.1E-04	2.4E-04	1.1E-04	1.1E-04
Nb-94	3.7E-06	9.0E-06	1.7E-06	4.2E-06	1.5E-06	3.4E-06	1.5E-06	1.5E-06
Ni-59	3.4E-07	9.1E-07	1.7E-07	4.3E-07	1.2E-07	2.8E-07	1.2E-07	1.1E-07
Ni-63	8.4E-07	2.3E-06	4.3E-07	1.1E-06	2.8E-07	6.6E-07	2.9E-07	2.6E-07
Np-237	4.8E-05	1.0E-04	4.0E-05	8.2E-05	8.7E-05	1.8E-04	8.7E-05	8.5E-05
Pa-231	4.9E-04	1.2E-03	4.7E-04	1.1E-03	6.4E-04	1.4E-03	6.5E-04	6.2E-04
Pb-210	9.3E-04	2.1E-03	7.5E-04	1.7E-03	5.7E-04	1.3E-03	5.6E-04	5.6E-04
Pd-107	2.8E-07	7.4E-07	1.2E-07	3.1E-07	6.8E-08	1.6E-07	7.0E-08	6.4E-08
Po-210	2.2E-03	4.7E-03	1.0E-03	2.1E-03	9.8E-04	2.0E-03	9.7E-04	9.6E-04
Pu-239	9.6E-05	2.0E-04	9.5E-05	2.0E-04	1.9E-04	4.0E-04	2.0E-04	1.9E-04
Ra-226	3.7E-04	9.5E-04	4.3E-04	1.1E-03	2.7E-04	6.1E-04	2.5E-04	2.6E-04
Se-79	4.1E-05	1.2E-04	2.5E-05	6.9E-05	5.7E-06	1.5E-05	5.4E-06	5.3E-06
Sn-126	2.0E-05	6.6E-05	1.0E-05	3.3E-05	7.9E-06	2.5E-05	5.7E-06	7.7E-06
Tc-99	1.4E-06	3.1E-06	6.4E-07	1.4E-06	5.9E-07	1.2E-06	6.1E-07	5.8E-07
Th-230	1.3E-04	3.2E-04	1.1E-04	2.6E-04	1.8E-04	3.9E-04	1.8E-04	1.8E-04
Th-232	1.5E-04	3.5E-04	1.3E-04	3.1E-04	2.0E-04	4.3E-04	2.0E-04	1.9E-04
U-238	4.5E-05	1.1E-04	3.5E-05	8.3E-05	4.4E-05	9.6E-05	4.4E-05	4.2E-05
Zr-93	2.0E-07	4.7E-07	2.3E-07	5.5E-07	9.4E-07	2.2E-06	8.7E-07	9.3E-07

7.18: BDCF^W für Referenzklimaregion Weser/Aller

Sv/a pro Bq/l	Kleinkind		Kind		Erwachsener	
	Durchschnitt	95%	Durchschnitt	95%	Durchschnitt	95%
C-14	2.7E-08	5.4E-08	1.4E-08	2.8E-08	1.1E-08	2.1E-08
Ac-227	7.0E-04	1.4E-03	5.1E-04	1.1E-03	8.5E-04	1.7E-03
Am-243	8.3E-05	1.7E-04	7.5E-05	1.6E-04	1.5E-04	3.1E-04
Cl-36	3.9E-06	1.0E-05	1.7E-06	4.3E-06	1.2E-06	2.8E-06
Cm-244	6.5E-05	1.4E-04	4.8E-05	9.9E-05	9.2E-05	1.9E-04
Cs-135	1.3E-06	4.1E-06	1.7E-06	4.9E-06	3.2E-06	9.1E-06
I-129	6.8E-05	1.5E-04	9.1E-05	2.0E-04	9.9E-05	2.1E-04
Nb-94	3.0E-06	7.0E-06	1.5E-06	3.4E-06	1.4E-06	3.1E-06
Ni-59	2.2E-07	5.7E-07	1.1E-07	2.7E-07	8.5E-08	2.0E-07
Ni-63	5.4E-07	1.4E-06	2.7E-07	6.8E-07	2.0E-07	4.7E-07
Np-237	4.7E-05	9.8E-05	3.8E-05	7.8E-05	8.5E-05	1.7E-04
Pa-231	3.9E-04	9.1E-04	3.9E-04	8.8E-04	5.9E-04	1.2E-03
Pb-210	8.8E-04	2.0E-03	7.0E-04	1.6E-03	5.6E-04	1.2E-03
Pd-107	1.8E-07	4.7E-07	7.7E-08	1.9E-07	4.9E-08	1.1E-07
Po-210	2.1E-03	4.4E-03	9.3E-04	2.0E-03	9.5E-04	2.0E-03
Pu-239	9.4E-05	1.9E-04	9.1E-05	1.9E-04	1.9E-04	3.9E-04
Ra-226	3.1E-04	7.5E-04	3.6E-04	8.7E-04	2.5E-04	5.5E-04
Se-79	3.1E-05	8.7E-05	1.9E-05	5.1E-05	4.6E-06	1.2E-05
Sn-126	1.7E-05	5.8E-05	8.6E-06	2.8E-05	7.1E-06	2.3E-05
Tc-99	1.2E-06	2.7E-06	5.3E-07	1.1E-06	5.3E-07	1.1E-06
Th-230	1.1E-04	2.6E-04	9.6E-05	2.1E-04	1.7E-04	3.6E-04
Th-232	1.3E-04	2.8E-04	1.2E-04	2.6E-04	1.9E-04	4.0E-04
U-238	3.7E-05	8.6E-05	2.9E-05	6.7E-05	4.0E-05	8.6E-05
Zr-93	1.9E-07	4.6E-07	2.2E-07	5.3E-07	9.2E-07	2.1E-06

7.19: BDCF^W für Referenzklimaregion Donau

Sv/a pro Bq/l	Kleinkind		Kind		Erwachsener	
	Durchschnitt	95%	Durchschnitt	95%	Durchschnitt	95%
C-14	3.4E-09	6.7E-09	1.8E-09	3.5E-09	1.4E-09	2.6E-09
Ac-227	6.9E-04	1.4E-03	5.1E-04	1.1E-03	8.4E-04	1.7E-03
Am-243	8.3E-05	1.7E-04	7.4E-05	1.5E-04	1.5E-04	3.1E-04
Cl-36	3.3E-06	8.7E-06	1.5E-06	3.6E-06	1.1E-06	2.5E-06
Cm-244	6.5E-05	1.4E-04	4.7E-05	9.8E-05	9.2E-05	1.9E-04
Cs-135	1.2E-06	3.7E-06	1.4E-06	4.3E-06	2.9E-06	8.5E-06
I-129	6.2E-05	1.4E-04	8.1E-05	1.8E-04	9.3E-05	2.0E-04
Nb-94	2.6E-06	5.9E-06	1.3E-06	2.9E-06	1.4E-06	2.9E-06
Ni-59	1.6E-07	4.0E-07	7.5E-08	1.9E-07	6.9E-08	1.6E-07
Ni-63	3.9E-07	9.9E-07	1.9E-07	4.8E-07	1.7E-07	3.8E-07
Np-237	4.7E-05	9.7E-05	3.7E-05	7.8E-05	8.4E-05	1.7E-04
Pa-231	3.4E-04	7.6E-04	3.5E-04	7.6E-04	5.7E-04	1.2E-03
Pb-210	8.7E-04	2.0E-03	6.9E-04	1.6E-03	5.5E-04	1.2E-03
Pd-107	1.3E-07	3.2E-07	5.4E-08	1.3E-07	4.0E-08	9.2E-08
Po-210	2.0E-03	4.3E-03	9.1E-04	1.9E-03	9.4E-04	1.9E-03
Pu-239	9.3E-05	1.9E-04	9.0E-05	1.9E-04	1.9E-04	3.9E-04
Ra-226	2.7E-04	6.4E-04	3.3E-04	7.7E-04	2.4E-04	5.2E-04
Se-79	2.5E-05	7.1E-05	1.5E-05	4.2E-05	4.0E-06	1.0E-05
Sn-126	1.5E-05	5.4E-05	7.8E-06	2.6E-05	6.7E-06	2.2E-05
Tc-99	1.1E-06	2.5E-06	4.8E-07	1.0E-06	5.1E-07	1.1E-06
Th-230	1.0E-04	2.3E-04	8.9E-05	1.9E-04	1.7E-04	3.5E-04
Th-232	1.1E-04	2.5E-04	1.1E-04	2.3E-04	1.8E-04	3.8E-04
U-238	3.2E-05	7.2E-05	2.6E-05	5.8E-05	3.9E-05	8.2E-05
Zr-93	1.9E-07	4.6E-07	2.2E-07	5.3E-07	9.2E-07	2.1E-06

7.20: BDCF^W für die gemäßigten Referenzklimaregionen Santander und Rostow

Sv/a pro Bq/l	Santander			Rostow		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
C-14	3.1E-08	1.7E-08	1.3E-08	1.4E-07	7.5E-08	5.7E-08
Ac-227	7.5E-04	5.6E-04	8.9E-04	1.3E-03	1.1E-03	1.5E-03
Am-243	9.0E-05	8.2E-05	1.6E-04	1.5E-04	1.5E-04	2.7E-04
Cl-36	5.3E-06	2.4E-06	1.6E-06	1.1E-05	5.2E-06	3.1E-06
Cm-244	7.0E-05	5.2E-05	9.7E-05	1.2E-04	9.8E-05	1.6E-04
Cs-135	2.1E-06	2.8E-06	5.0E-06	4.5E-06	6.3E-06	9.9E-06
I-129	8.6E-05	1.2E-04	1.2E-04	2.0E-04	3.3E-04	2.7E-04
Nb-94	3.5E-06	1.7E-06	1.6E-06	7.1E-06	3.5E-06	2.8E-06
Ni-59	3.4E-07	1.8E-07	1.3E-07	1.0E-06	6.3E-07	4.1E-07
Ni-63	8.5E-07	4.5E-07	3.1E-07	2.6E-06	1.6E-06	9.8E-07
Np-237	5.1E-05	4.2E-05	9.0E-05	8.7E-05	7.7E-05	1.5E-04
Pa-231	4.6E-04	4.5E-04	6.4E-04	9.3E-04	9.4E-04	1.1E-03
Pb-210	1.0E-03	8.2E-04	6.2E-04	1.7E-03	1.5E-03	1.0E-03
Pd-107	2.8E-07	1.3E-07	7.4E-08	8.5E-07	4.6E-07	2.4E-07
Po-210	2.3E-03	1.1E-03	1.0E-03	4.0E-03	2.0E-03	1.7E-03
Pu-239	1.0E-04	1.0E-04	2.0E-04	1.7E-04	1.9E-04	3.4E-04
Ra-226	3.7E-04	4.4E-04	2.8E-04	7.3E-04	8.8E-04	4.9E-04
Se-79	4.2E-05	2.6E-05	6.0E-06	8.2E-05	5.5E-05	1.2E-05
Sn-126	2.9E-05	1.5E-05	1.1E-05	5.9E-05	3.5E-05	2.3E-05
Tc-99	1.5E-06	7.0E-07	6.2E-07	3.8E-06	2.0E-06	1.5E-06
Th-230	1.3E-04	1.1E-04	1.9E-04	2.5E-04	2.2E-04	3.3E-04
Th-232	1.4E-04	1.3E-04	2.0E-04	2.8E-04	2.7E-04	3.6E-04
U-238	4.3E-05	3.4E-05	4.4E-05	8.7E-05	7.0E-05	7.9E-05
Zr-93	2.3E-07	2.7E-07	1.1E-06	3.8E-07	4.8E-07	1.7E-06

7.21: BDCF^W für die borealen Referenzklimaregionen Turku, Sodankylä und Vardo

Sv/a pro Bq/l	Turku			Sodankylä			Vardo		
	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener	Kleinkind	Kind	Erwachsener
C-14	2.9E-08	1.5E-08	1.1E-08	8.7E-09	4.6E-09	3.5E-09	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Ac-227	7.8E-04	5.8E-04	9.2E-04	7.7E-04	5.7E-04	9.1E-04	7.1E-04	5.5E-04	8.9E-04
Am-243	9.4E-05	8.6E-05	1.7E-04	9.3E-05	8.3E-05	1.7E-04	8.4E-05	7.5E-05	1.6E-04
Cl-36	8.8E-06	3.4E-06	2.0E-06	7.4E-06	2.9E-06	1.8E-06	5.3E-06	2.3E-06	1.6E-06
Cm-244	7.4E-05	5.5E-05	1.0E-04	7.3E-05	5.3E-05	9.9E-05	6.6E-05	4.8E-05	9.3E-05
Cs-135	4.8E-06	5.4E-06	9.9E-06	4.5E-06	5.0E-06	9.5E-06	3.7E-06	4.3E-06	8.5E-06
I-129	1.0E-04	1.3E-04	1.2E-04	9.1E-05	1.1E-04	1.1E-04	7.3E-05	1.1E-04	1.2E-04
Nb-94	5.2E-06	2.4E-06	1.9E-06	4.2E-06	2.0E-06	1.8E-06	3.2E-06	1.6E-06	1.6E-06
Ni-59	4.8E-07	2.1E-07	1.4E-07	3.4E-07	1.5E-07	1.1E-07	1.7E-07	7.6E-08	7.0E-08
Ni-63	1.2E-06	5.4E-07	3.4E-07	8.5E-07	3.9E-07	2.7E-07	4.2E-07	1.9E-07	1.7E-07
Np-237	5.2E-05	4.2E-05	9.1E-05	5.2E-05	4.1E-05	9.0E-05	4.7E-05	3.7E-05	8.4E-05
Pa-231	6.3E-04	5.8E-04	7.1E-04	5.0E-04	4.8E-04	6.5E-04	3.7E-04	3.6E-04	5.6E-04
Pb-210	1.5E-03	1.1E-03	8.1E-04	1.4E-03	1.1E-03	8.0E-04	1.3E-03	1.0E-03	7.4E-04
Pd-107	3.8E-07	1.5E-07	7.8E-08	2.7E-07	1.1E-07	6.1E-08	1.3E-07	4.7E-08	3.5E-08
Po-210	2.5E-03	1.1E-03	1.1E-03	2.4E-03	1.1E-03	1.0E-03	2.2E-03	1.1E-03	1.0E-03
Pu-239	1.0E-04	1.0E-04	2.0E-04	1.0E-04	9.8E-05	2.0E-04	9.1E-05	8.8E-05	1.9E-04
Ra-226	6.1E-04	6.8E-04	3.9E-04	5.1E-04	6.0E-04	3.6E-04	4.1E-04	5.0E-04	3.3E-04
Se-79	7.9E-05	4.6E-05	9.4E-06	6.6E-05	3.8E-05	8.1E-06	4.3E-05	2.6E-05	6.0E-06
Sn-126	7.6E-05	3.7E-05	2.9E-05	7.4E-05	3.6E-05	2.8E-05	6.2E-05	3.1E-05	2.5E-05
Tc-99	1.6E-06	7.0E-07	6.4E-07	1.5E-06	6.2E-07	6.0E-07	1.2E-06	4.8E-07	5.2E-07
Th-230	1.8E-04	1.4E-04	2.1E-04	1.5E-04	1.2E-04	2.0E-04	1.2E-04	9.7E-05	1.8E-04
Th-232	1.9E-04	1.7E-04	2.3E-04	1.6E-04	1.5E-04	2.2E-04	1.3E-04	1.2E-04	1.9E-04
U-238	6.2E-05	4.6E-05	5.2E-05	5.0E-05	3.8E-05	4.7E-05	3.7E-05	3.0E-05	4.2E-05
Zr-93	3.9E-07	4.5E-07	1.6E-06	3.9E-07	4.4E-07	1.6E-06	3.5E-07	4.0E-07	1.5E-06

8: Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Modellrechnungen diskutiert. Da sich die berechneten BDCF für die unterschiedlichen Radionuklide um mehrere Größenordnungen unterscheiden, wurde zur graphischen Darstellung zusätzlich zu den Werten ins Sv/a das Verhältnis des entsprechenden BDCF zu einem Referenz-BDCF verwendet. Die Werte für die $BDCF^W$ in Sv/a pro Bq/l Grundwasser und für die $BDCF^S$ in Sv/a pro Bq/kg Boden sind in den Tabellen in **Kapitel 7** zusammengefasst.

8.1: Beitrag der Expositionspfade zur Gesamtexposition

Aufgrund der Aufspaltung in einen von der Aktivität im Grundwasser abhängigen $BDCF^W$ und einen von der Aktivität im Boden abhängigen $BDCF^S$, kann der Beitrag der Expositionspfade zum $BDCF^S$ und der aufgenommenen Nahrungsmittel und der Trinkwassermenge zum $BDCF^W$ berechnet werden.

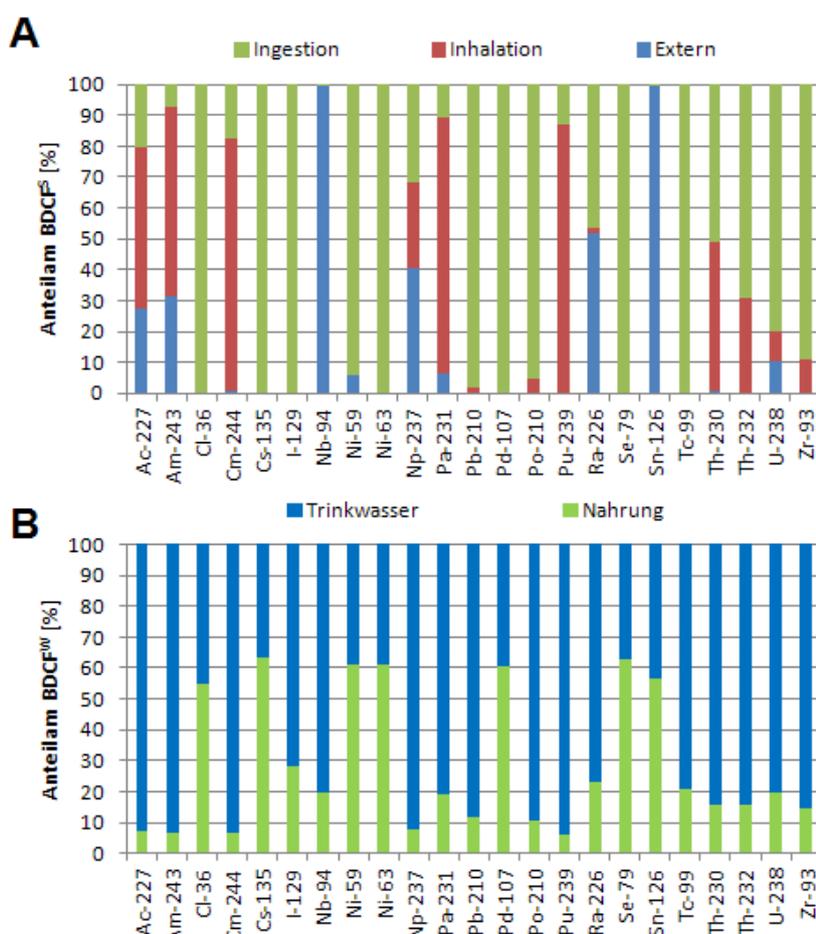


Abbildung 17: Beitrag der A) Expositionspfade zum $BDCF^S$ und B) des Trinkwassers und der Nahrung zum $BDCF^W$ für die Referenzregion Elbe, Erwachsene und Sand Boden.

Dabei zeigt sich, dass je nach Radionuklid verschiedene Expositionspfade den Hauptanteil des $BDCF^S$ stellen. So wird zum Beispiel die Cs-135 Exposition hauptsächlich durch den Ingestionspfad, die Pu-239 Exposition durch den Inhalationspfad und die Sn-126 Exposition durch externe Exposition bestimmt. Bei dem $BDCF^W$ dominiert für die meisten Radionuklide die über das Trinkwasser aufgenommene Aktivität (**Abbildung 17**).

8.2: Bodenklassen

Die unterschiedlichen Bodenklassen haben nur bei der Modellierung des $BDCF^S$ einen Beitrag, da bei der Modellierung des $BDCF^W$ keine Radionuklide im Boden vorhanden sind. Dementsprechend wurden für die $BDCF^W$ in **Kapitel 7** keine getrennten Werte für unterschiedliche Bodentypen angegeben.

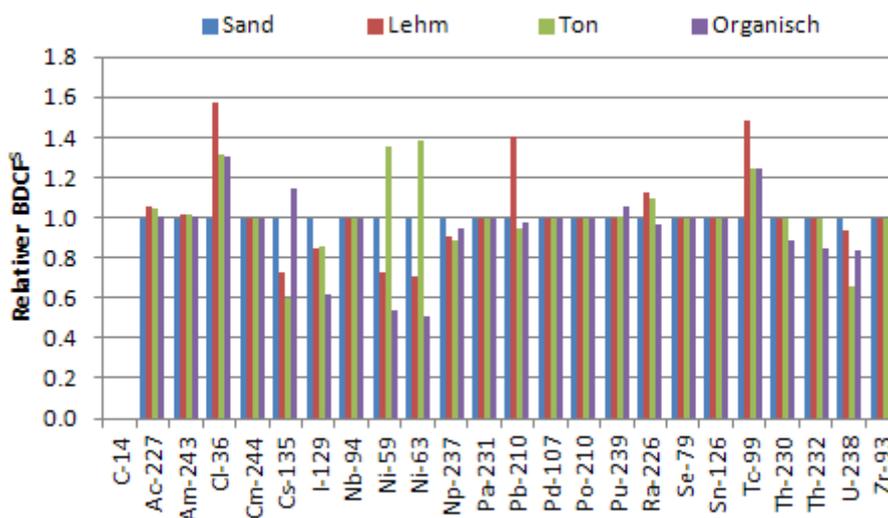


Abbildung 18: Relative $BDCF^S$ für die verschiedenen Bodentypen verglichen mit Sandboden (=1) für die Referenzregion Elbe und eine erwachsene Altersgruppe mit Durchschnittsernährung.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Bodenklassen auf den $BDCF^S$ sind ausschließlich auf die Transferfaktoren Boden zu Pflanze zurückzuführen und sind dementsprechend für die borealen, gemäßigten und subtropischen Referenzklimaregionen unterschiedlich. Wenn in den Parametersammlungen keine unterschiedlichen Transferfaktoren für die einzelnen Bodentypen angegeben sind, wie zum Beispiel bei Se-79, dann sind die $BDCF^S$ für die Bodentypen gleich (**Abbildung 18**). Außerdem können nur dann entscheidende Auswirkungen unterschiedlicher Transferfaktoren auf den $BDCF^S$ beobachtet werden, wenn der Ingestionspfad einen entsprechend großen Beitrag zum $BDCF^S$ leistet (**Abbildung 17a**).

Größere Unterschiede sind zu erwarten, wenn die Anreicherung von Radionukliden in den unterschiedlichen Böden über längere Zeiträume betrachtet und die resultierenden Aktivitäten in das Modell übernommen werden.

8.3: Unterschiedliche Ernährungsgewohnheiten

Zur Analyse der Auswirkung unterschiedlicher Ernährungsgewohnheiten in einer Referenzklimaregion wurden unterschiedliche Ernährungsszenarien für die Elbe Referenzklimaregion aufgestellt. Das erste Szenario geht von einem Erwachsenen aus, der die in der StrSchV vorgegebenen Durchschnittsmengen an Nahrung zu sich nimmt. Das zweite Szenario geht von einem Erwachsenen, dessen Ernährung gemäß des 95% der Nahrungsaufnahme erfolgt, aus. Das dritte Szenario modelliert die Nahrungsgewohnheiten eines generischen Vegetariers. Abschließend wurde noch ein historisches Szenario mit Klima und Ernährungsdaten von 1900 aufgestellt (**Abbildung 19**). Entsprechend der höheren Nahrungsaufnahme sind die $BDCF^S$ und $BDCF^W$ für das 95% höher als für eine Durchschnittsernährung.

Der Hauptgrund für die hohen Abweichungen der $BDCF^W$ von Cs-136 und Sn-126 für vegetarische und 95% der Ernährungsweisen von der Durchschnittsernährung sind die unterschiedlichen Annahmen bei der Berechnung der Aktivitäten im Süßwasserfisch und bei der Berechnung von pflanzlichen und tierischen landwirtschaftlichen Produkten. Diese führen zu relativ hohen Cs-135 Aktivitäten im Süßwasserfisch mit 296 Bq/kg, im Vergleich zu zum Beispiel Schweinefleisch mit 5,2 Bq/kg, oder Fruchtgemüse mit 1,5 Bq/kg. Trotz der relativ geringen Menge an verspeistem Süßwasserfisch kommt es damit zu einem starken Ungleichgewicht in dessen Beitrag zu gesamt $BDCF^W$ (**Abbildung 19a**). Im Gegensatz dazu sind die Aktivitätskonzentrationen in pflanzlicher und tierischer Nahrung in den meisten Fällen so ähnlich, dass ähnliche Aktivitätsmengen bei einer Vegetarischen- und Durchschnittsernährung aufgenommen werden. Die berechneten $BDCF^W$ für eine historische Ernährungsweise um 1900 sind ähnlich denen einer Durchschnittsernährung zur Jetztzeit.

Ein weiterer Grund für die geringen Unterschiede der $BDCF^W$ bei verschiedenen Ernährungsweisen ist die große Bedeutung des aufgenommenen Trinkwassers (**Abbildung 17b**). Da sowohl bei der Durchschnittsernährung, als auch bei der vegetarischen und historischen Ernährung die gleiche Trinkwassermenge aufgenommen wird, sind der $BDCF^W$ relativ ähnlich.

Bei den $BDCF^S$ muss ein relevanter Anteil des Ingestionspfades an der Gesamtexposition gegeben sein, um Unterschiede in der Ernährungsweise beurteilen zu können. Da zum Beispiel bei Nb-94 und Sn-126 der $BDCF^S$ durch die externe Exposition dominiert ist (**Abbildung 17a**), sieht man hier keine Auswirkung unterschiedlicher Ernährungsweisen (**Abbildung 19b**).

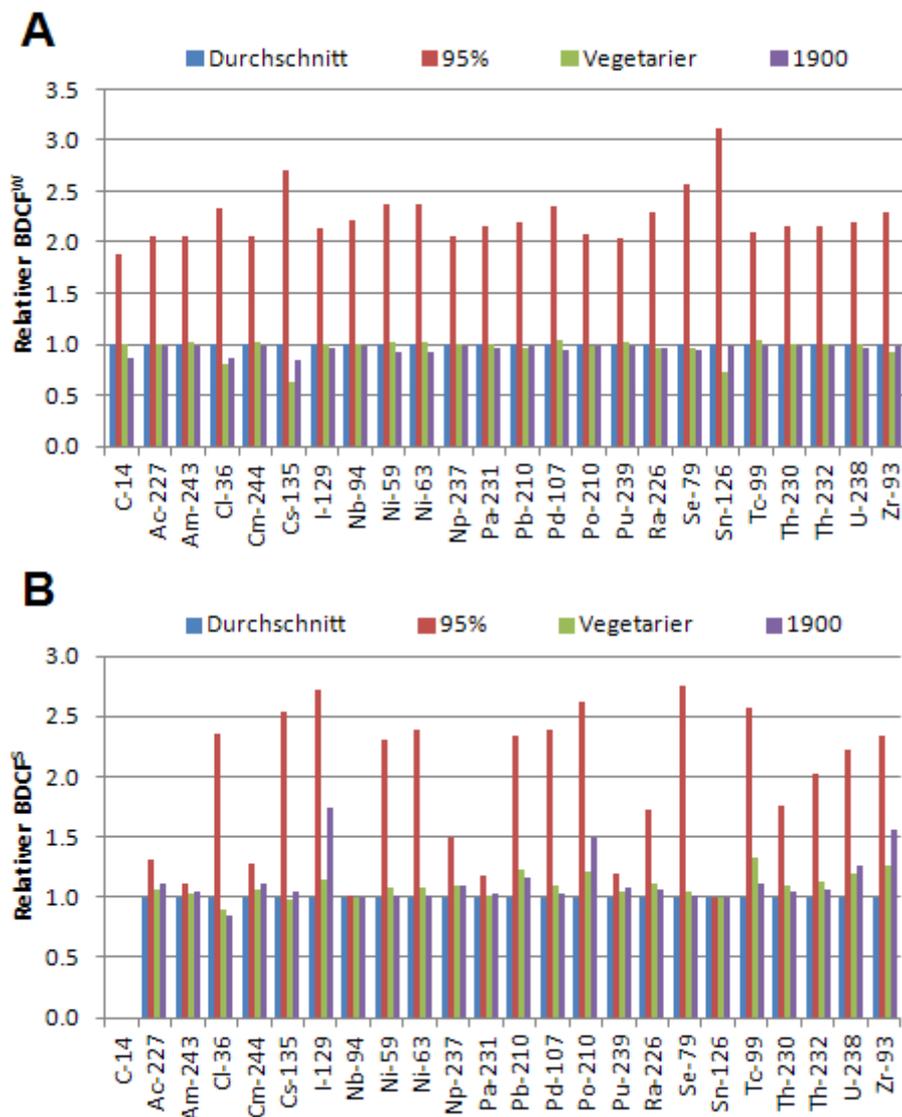


Abbildung 19: Relativer A) $BDCF^W$ und B) $BDCF^S$ für einen Durchschnittserwachsenen, einen Erwachsenen, dessen Ernährung bei dem 95% liegt, einen Vegetarier und eine historische Ernährungsweise um 1900. Der Wert für einen Durchschnittserwachsenen wird dabei auf 1 gesetzt. Die Werte sind für einen Sandboden und die Referenzregion Elbe berechnet.

Die Auswirkungen historischer und vegetarischer Ernährungsweisen auf den $BDCF^S$ sind ansonsten größer als auf die $BDCF^W$, da bei den $BDCF^S$ das aufgenommene Trinkwasser keine Aktivität aufweist.

8.4: Unterschiedliche Altersgruppen

Aufgrund unterschiedlicher Atemraten, Nahrungsmengen und Dosiskonversionsfaktoren unterscheiden sich die berechneten BDCF der verschiedenen Altersgruppen. Im Vergleich zu den BDCF für Erwachsene, gibt es bei den BDCF für Kinder und Kleinkinder keinen eindeutigen Trend.

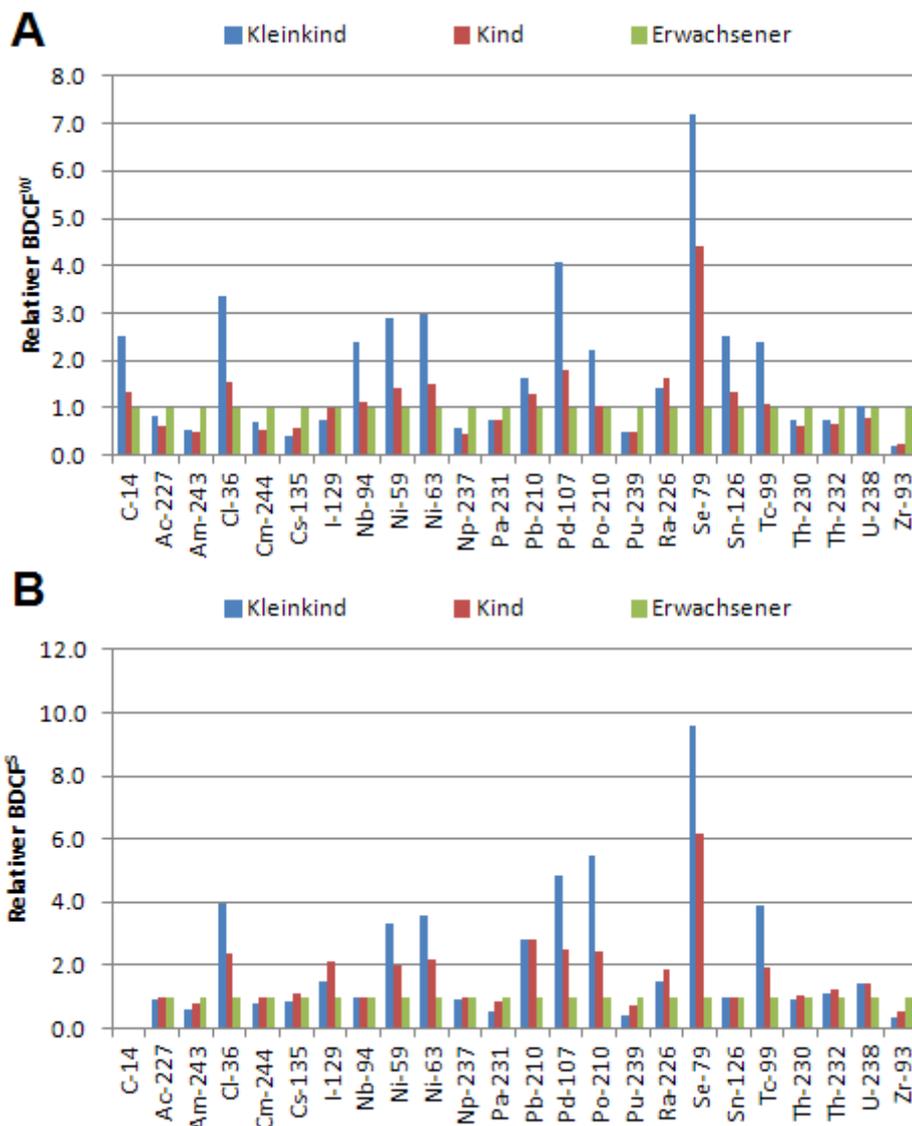


Abbildung 20: Relativer A) $BDCF^W$ und B) $BDCF^S$ für einen Erwachsenen (=1) im Vergleich zu Kindern und Kleinkindern. Die Werte sind für einen Sandboden und die Referenzregion Elbe berechnet.

Bei manchen Radionukliden liegen die BDCF über denen von Erwachsenen, bei manchen unter denen von Erwachsenen (**Abbildung 20**). Die Unterschiede der BDCF zwischen den einzelnen Altersgruppen bewegen sich innerhalb einer Größenordnung.

8.5: Referenzregionen in Nord und Süddeutschland

Unterschiede in den BDCF der verschiedenen Referenzregionen in Deutschland lassen sich auf unterschiedliche Klimabedingungen (**Tabelle 2**) und unterschiedliche Ernährungsweisen (**Tabelle 9**) zurückführen.

Die Bewässerung der landwirtschaftlichen Flächen und die durchschnittliche Menge der aufgenommenen Nahrung ist in der Elbe Region am höchsten, gefolgt von der Weser/Aller Region und der Donau Region. Entsprechend sind die $BDCF^W$ für die meisten Radionuklide für die Elbe Region am höchsten und für die Donau Region am niedrigsten. Die $BDCF^W$ für die Weser/Aller Region liegen zwischen den beiden anderen Regionen (**Abbildung 21**).

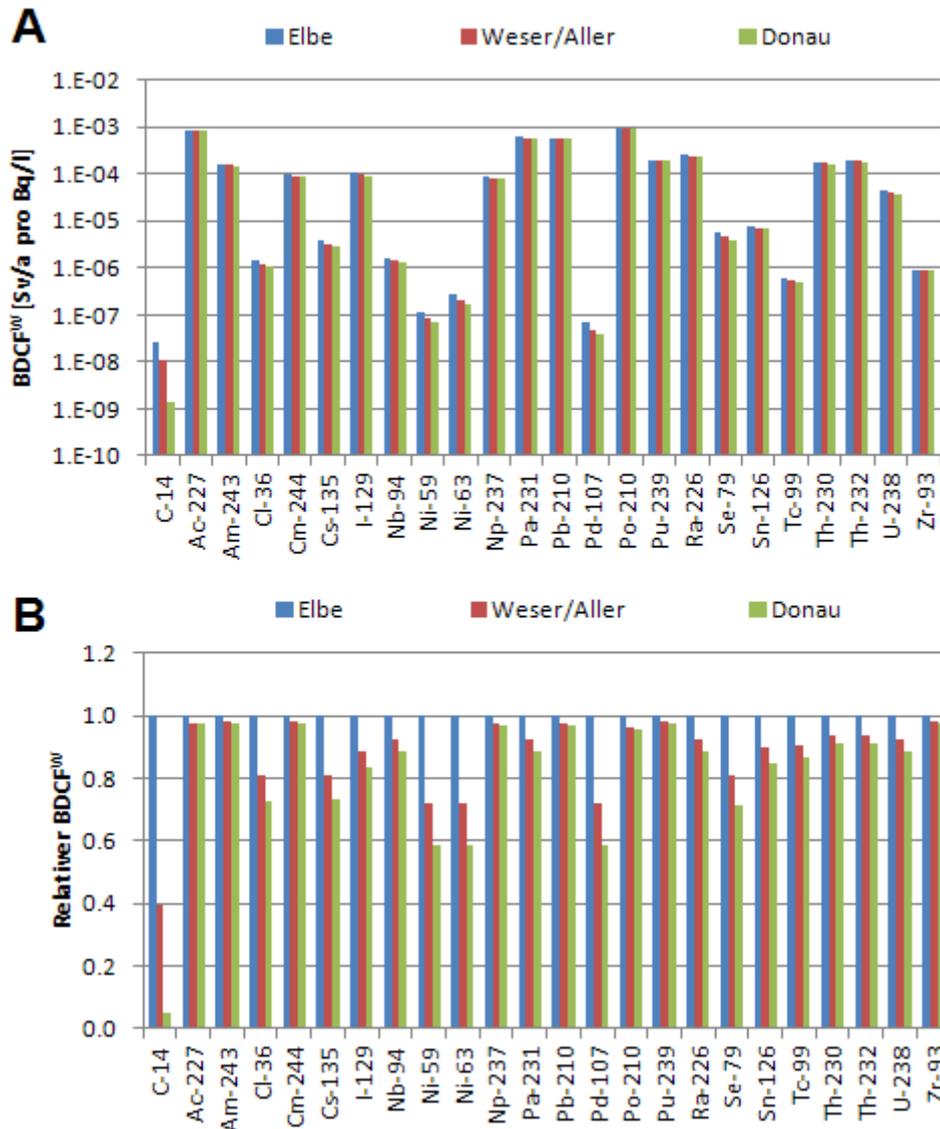


Abbildung 21: $BDCF^W$ für die drei deutschen Referenzklimaregionen A) Werte, B) Relativwerte im Vergleich zu Elbe (=1). Die Werte sind für Sandböden und die erwachsene Altersgruppe mit Durchschnittsernährung angegeben.

Die Unterschiede der $BDCF^S$ in den unterschiedlichen deutschen Referenzregionen sind ausschließlich durch die unterschiedliche Ernährung bedingt. Für die meisten Radionuklide sind die $BDCF^S$ für die Elbe Region am höchsten. Die einzige Ausnahme hierzu ist Tc-99, das in der Donau Region den höchsten $BDCF^S$ aufweist (**Abbildung 22**).

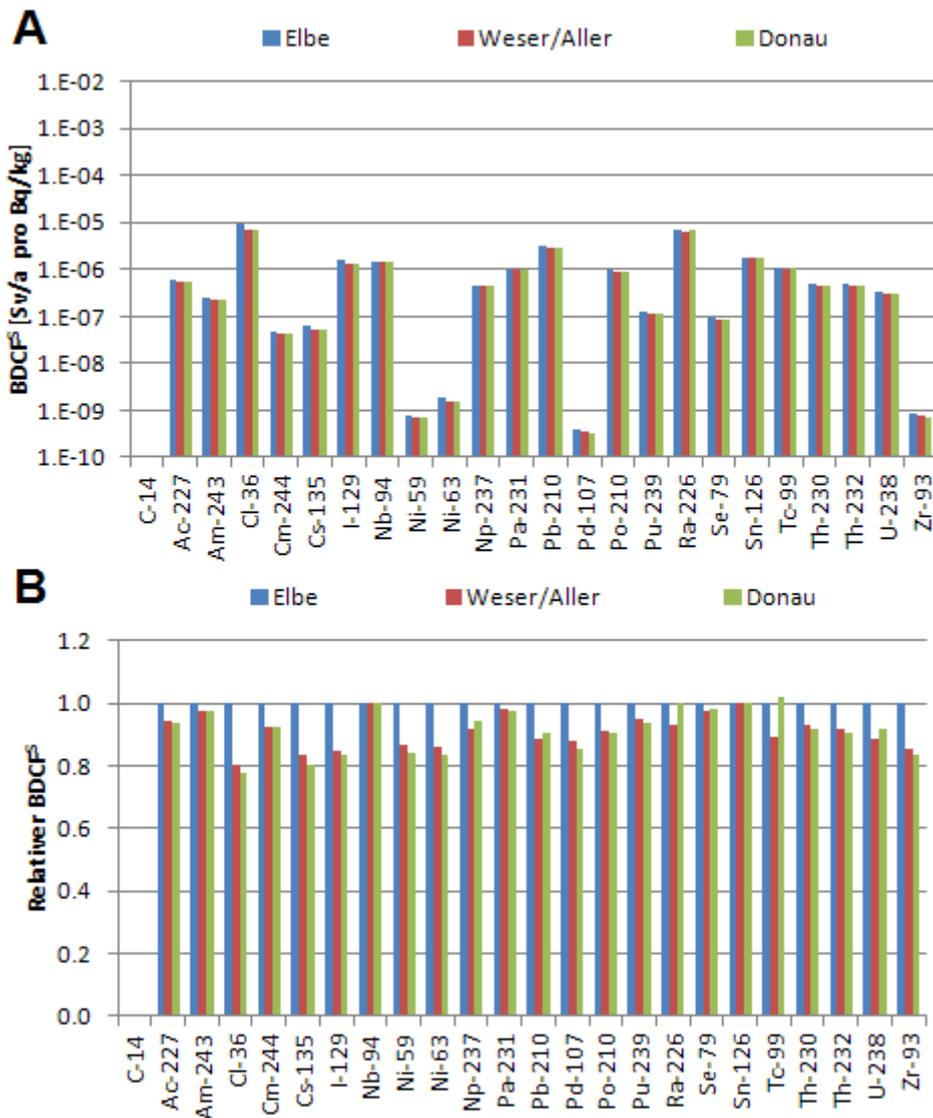


Abbildung 22: BDCF^S für die drei deutschen Referenzklimaregionen A) Werte, B) Relativwerte im Vergleich zu Elbe (=1). Die Werte sind für Sandböden und die erwachsene Altersgruppe mit Durchschnittsernährung angegeben.

8.6: Referenzregionen zum Klimawandel

Die höchsten BDCF^W können in den warmen, sowie den trockenen subtropischen und gemäßigten Referenzklimaregionen mit hohem Trinkwasserverbrauch und hohen Bewässerungsraten beobachtet werden. Die niedrigsten BDCF^W sind je nach Radionuklid in den gemäßigten Referenzregionen Santander und Elbe oder den borealen Klimazonen zu beobachten.

Für die borealen Klimaregionen Turku, Sodankylä und Vardo können für einige Radionuklide, z.B. Cs-135 und Sn-126 relativ hohe Werte beobachtet werden. Diese Werte können auf die relativ hohe Menge an verzehrtem Speisefisch in den borealen Referenzregionen zurückgeführt werden (**Abbildung 23**).

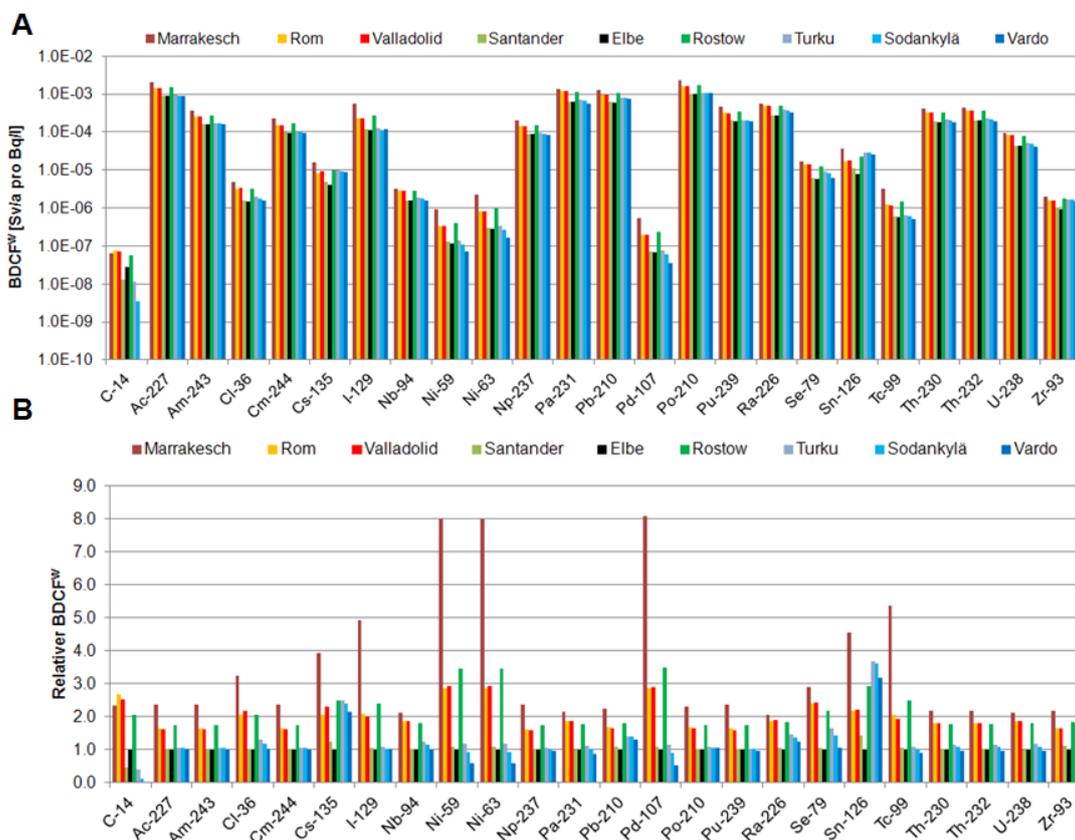


Abbildung 23: A) Absolute und B) relative $BDCF^W$ für die verschiedenen Referenzklimaregionen verglichen mit der Referenzklimaregion Elbe (=1). Die Werte sind für Erwachsene und Sandboden angegeben.

Die auch im Vergleich mit anderen subtropischen und trockenen Klimazonen mit hohen Bewässerungsraten sehr hohen $BDCF^W$ Werte für Marrakesch lassen sich durch den relativ geringen Getreide Ertrag von 100 t/km^2 in Marokko erklären (**Tabelle 7**). Der Ertrag beeinflusst in dem Modell über die Blattaufnahme die Aktivität in Nutzpflanzen, wobei ein niedriger Ertrag zu hohen Aktivitäten führt (**Gleichung 4**). Zusammen mit dem hohen Getreideverbrauch in Marokko (**Tabelle 8**) führt dies zu relativ hohen $BDCF^W$.

Da die $BDCF^S$ das Resultat der Beiträge der Expositionspfade Inhalation, Ingestion und externe Exposition sind, sind die Auswirkungen der Parameter je nach Radionuklid komplexer zu beurteilen als bei den $BDCF^W$. Radionuklide mit einem großen Beitrag des Inhalationspfades auf den $BDCF^S$, wie Cm-244, Pa-231 und Pu-239, haben relativ hohe $BDCF^S$ in den warmen und/oder trockenen Referenzregionen Marrakesch, Rom, Valladolid und Rostow, da das Modell dort höhere Staubkonzentrationen in der Luft annimmt. Die unterschiedlichen Ernährungsgewohnheiten und Transferfaktoren Boden zu Pflanze tragen

ebenfalls zu Unterschieden in den $BDCF^S$ bei. Der relativ hohe $BDCF^S$ Wert für Po-210 in der Referenzklimaregion Vardo lässt sich zum Beispiel auf die hohe Menge verzehrten Rentierfleisches zurückführen (**Abbildung 24**).

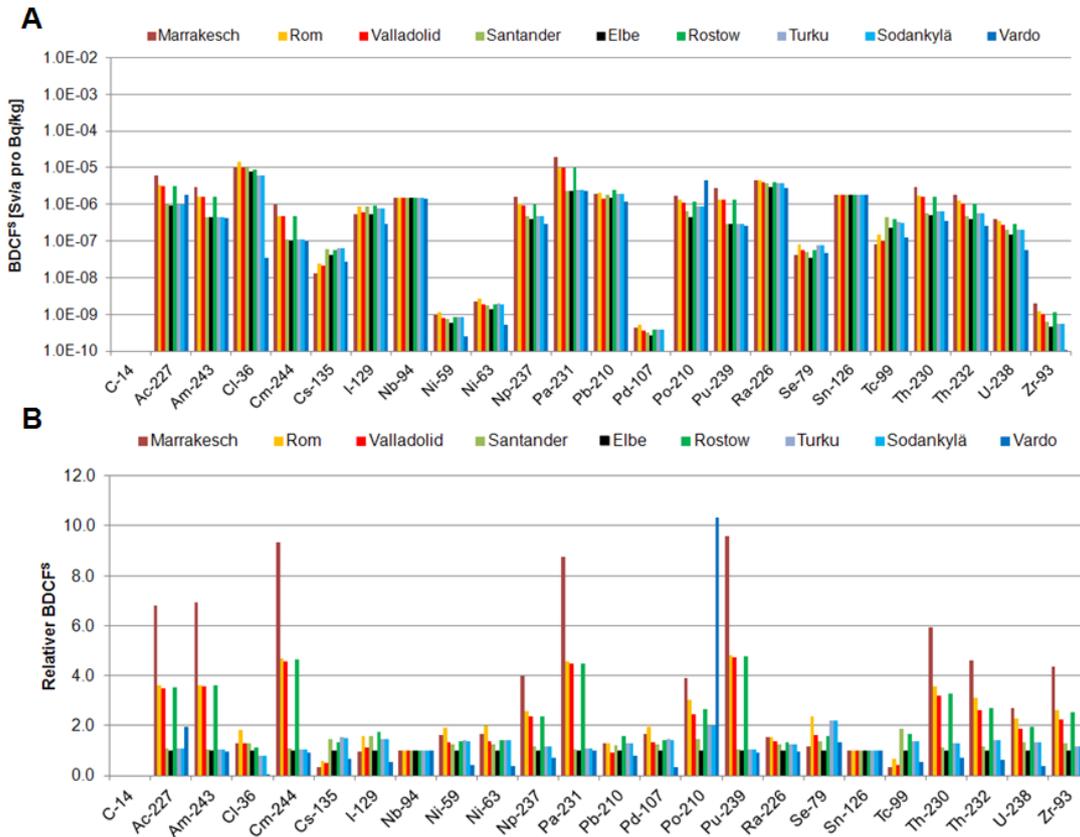


Abbildung 24: A) Absolute und B) relative $BDCF^S$ für die verschiedenen Referenzklimaregionen verglichen mit der Referenzklimaregion Elbe (=1). Die Werte sind für Erwachsene und Sandboden angegeben.

8.7: Zusammenfassung

Das Verhalten von Radionukliden in den verschiedenen Bodenklassen und unterschiedlichen Klimaregionen ist einer der Parameter, die in Zukunft noch genauer betrachtet werden muss, um realistische Aktivitäten im Boden im Vergleich zu gegebenen Aktivitäten im Grundwasser zu berechnen. Damit eng im Zusammenhang steht der Parameter Transferfaktor Boden zu Pflanze. Es gibt für diesen Parameter zwar teilweise extensive Parametersammlungen, da diese empirisch gemessenen Werte allerdings eine große Spannweite aufweisen, sind sie kritisch zu betrachten. Außerdem ist die Datenlage nicht für alle Radionuklid-Bodenklasse-Pflanzenart-Klima Kombinationen gleich gut. Aus diesem Grund müssen oft Annahmen, begründet auf dem Verhalten chemisch ähnlicher Elemente, getroffen werden.

Die relative Bedeutung der verschiedenen Expositionspfade ist je nach Radionuklid unterschiedlich. Bei der in diesem Projekt verwendeten Auswahl an Radionukliden gibt es sowohl Radionuklide, bei denen der Ingestionspfad, der Inhalationspfad oder die externe Exposition dominiert. Aus diesem Grund kann bei der Modellierung auch keiner dieser Pfade vernachlässigt werden.

Parameter, die einen Einfluss auf die Exposition haben, sind das Klima und die Lebensgewohnheiten der exponierten Gruppe. Da die Lebensgewohnheiten einer exponierten Gruppe durch das Klima beeinflusst werden, müssen bei der Modellierung gewisse Annahmen getroffen werden. Zwei der wichtigsten Faktoren, die Bewässerungsraten in der Landwirtschaft und Trinkwasserverbrauch, sind jedoch relativ gut fundiert. Bewässerung wird über längere Zeiträume nachhaltig und wirtschaftlich nur so möglich sein, dass gerade so viel bewässert wird, dass ein guter Ertrag möglich ist und dass es nicht zur Versalzung des Bodens kommt. Ebenso benötigt ein Mensch ein gewisses Minimum an Wasser pro Tag, kann jedoch auch nicht mehr als ein bestimmtes Maximum zu sich nehmen. Der Vergleich zwischen den BDCF für unterschiedliche Ernährungsweisen hat gezeigt, dass die Art der aufgenommenen Nahrung insgesamt weniger relevant ist als die Menge.

Da die Bewässerungsraten sowohl die Akkumulation von Radionukliden im Boden als auch die direkte Radionuklidaufnahme über Pflanzenblätter beeinflusst, kann allgemein gesagt werden, dass höhere Bewässerungsraten mit kontaminiertem Grundwasser zu höheren BDCF führen. Zusätzlich kann der landwirtschaftliche Ertrag einer Pflanzensorte über die Aktivitätsaufnahme der Pflanzenblätter die Gesamtaktivität in den Pflanzen beeinflussen. Der Ertrag ist dabei stark von dem vorherrschenden Klima abhängig. Ebenso haben Referenzklimaregionen mit trockenem und/oder warmem Klima neben hohen Bewässerungsraten auch einen erhöhten Trinkwasserverbrauch, was ebenfalls zu einer höheren Exposition führt.

Insgesamt weist die süddeutsche Referenzklimaregion Donau im Vergleich zu den norddeutschen Referenzklimaregionen Weser/Aller und Elbe, aufgrund niedriger Bewässerungsraten und durchschnittlich geringerem Nahrungsmittelverbrauch, niedrigere BDCF^W und teilweise niedrigere BDCF^S auf. Berücksichtigt man bei der Betrachtung neben den BDCF für die Referenzklimaregionen noch die Abfolge der Referenzklimaregionen nach BIOCLIM (**Abbildung 12**), so zeigt sich, dass in der süddeutschen Referenzklimaregion Donau bei beiden möglichen Szenarien zur Entwicklung des Klimas in den nächsten 200.000 Jahren niedrigere BDCF zu erwarten sind, da hier entweder vorwiegend gemäßigte und boreale Klimabedingungen bzw. gemäßigte und nur relativ kurzzeitige subtropische Klimabedingungen vorherrschen. In den norddeutschen Klimaregionen sind aufgrund des eher maritimen Klimas nur kurzzeitige boreale Klimabedingungen und im erhöhten CO₂-Szenario lange andauernde subtropische Klimabedingungen zu erwarten, was zu höheren BDCF führt. Hinzu kommt, dass in der süddeutschen Referenzregion aufgrund der dortigen topographischen Gegebenheiten ein geringerer Anteil der Gesamtfläche zur Landwirtschaft genutzt wird (**Tabelle 3 und 4**).

Obwohl die süddeutsche Referenzklimaregion in der Biosphärenmodellierung somit unter den jetzigen Bedingungen, sowie auf die Zukunft projiziert, niedrigere BDCF aufweist, ist es dringend notwendig die Bedingungen des Transportes von Radionukliden in der Geosphäre und in der Geosphären/Biosphärengrenze Grundwasser/Ackerland genau zu ermitteln, da diese die Quellgrößen für Radionuklidaktivitäten in Grundwasser und Boden bestimmen und somit die endgültige Exposition entscheidend beeinflussen.

9: Anhang

9.1: FEP Liste

Tabelle 11a: Haupt-FEP Liste nach BIOMASS Methodologie (IAEA, 2003).

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
1	Begutachtungszusammenhang	Ja	
1.1	Begutachtungszweck	Ja	Hilfe zur Auswahl eines Endlager Standorts
1.2	Begutachtungsendpunkt	Ja	
1.2.1	Jährliche Individualdosis	Ja	Berechnung von BDCF
1.2.2	Lebenslange Individualdosis	Nein	
1.2.3	Jährliches Individualrisiko	Nein	
1.2.4	Lebenslanges Individualrisiko	Nein	
1.2.5	Kollektive Dosis/Risiko	Nein	
1.2.6	Dosis für nicht-menschliche Lebewesen	Nein	
1.2.7	Modifikationen in der Expositions Umgebung	Nein	
1.2.8	Stoffflüsse	Ja	Weitergabe von Radionukliden über die Nahrungskette zum Menschen
1.2.9	Nicht-radiologische Endpunkte	Nein	
1.2.10	Unsicherheiten und/oder Konfidenz	Ja	Sensitivitätsanalyse von Parametern
1.3	Begutachtungsphilosophie	Ja	Benutzerfreundlich und komplett
1.4	Endlager System	Ja	Endlagerung in Salz oder Ton
1.5	Kontext des Anlageorts	Ja	Landwirtschaftlich genutztes Land mit stehenden Vorflutern
1.6	Quellgröße	Ja	Grundwasser 1Bq/l Boden 1 Bq/kg
1.6.1	Geosphären/Biosphären Schnittstelle	Ja	Brunnen

Tabelle 11a: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
1.6.2	Abgabemechanismus	Ja	Brunnen
1.6.3	Quellgrößen Eigenschaften	Ja	Grundwasser, Boden
1.7	Zeitraum	Ja	10 ⁶ Jahre
1.8	Gesellschaftliche Annahmen	Ja	Gesellschaftliche Veränderung aufgrund eines Klimawandels
2	Biosphären-Merkmale	Ja	Derzeitige Biosphäre in Deutschland modifiziert durch Klimawandel
2.1	Klima	Ja	
2.1.1	Beschreibung von Klimawandel	Ja	
2.1.2	Kategorisierung des Klimas	Ja	Zur Auswahl der Klima- Referenzstationen
2.2	Menschliche Gesellschaft	Ja	Menschliche Ernährungsgewohnheiten und Landwirtschaftspraktiken
2.3	Grenzsysteme	Ja	Landwirtschaftlich genutztes Land, stehende Vorfluter
2.3.1	Umgebungstypen	Nein	Landwirtschaftlich genutzte Böden Sand, Lehm, Ton und organische Böden
2.3.1.1	Natürliche und Quasi- natürliche Lebensräume	Nein	
2.3.1.2	Landwirtschaftliche Lebensräume	Ja	Landwirtschaftlich genutztes Land, stehende Vorfluter
2.3.1.3	Städtische und industrielle Lebensräume	Nein	
2.3.2	Ökosystem	Ja	
2.3.2.1	Lebendige Komponenten des Ökosystems	Ja	Menschen, Tiere und Pflanzen
2.3.2.2	Nicht-lebendige Komponenten des Ökosystems	Ja	

Tabelle 11a: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
3	Biosphären-Ereignisse und Prozesse	Ja	
3.1	Natürliche Ereignisse und Prozesse	Ja	Temperatur und Luftfeuchtigkeit
3.1.1	Umgebungsänderungen	Ja	Klimawandel
3.1.1.1	Physikalische Veränderungen	Ja	
3.1.1.2	Chemische Veränderungen	Nein	
3.1.1.3	Ökologische Veränderungen	Ja	Klimawandel
3.1.2	Umgebungsdynamik	Nein	
3.1.2.1	Tägliche Änderungen	Nein	
3.1.2.2	Jahreszeitliche Änderungen	Nein	
3.1.2.3	Änderungen über mehrere Jahre und längere Zeiträume	Ja	Klimawandel
3.1.3	Kreisläufe und Verteilung von Material in lebendigen Komponenten	Ja	
3.1.3.1	Transport durch Flora und Fauna	Ja	Nahrungskette
3.1.3.1.1	Wurzelaufnahme	Ja	
3.1.3.1.2	Respiration	Nein	
3.1.3.1.3	Transpiration	Nein	
3.1.3.1.4	Aufnahme durch Fauna	Ja	
3.1.3.1.5	Interzeption	Ja	
3.1.3.1.6	Verwitterung	Ja	
3.1.3.1.7	Bioturbation	Nein	
3.1.3.2	Metabolisierung durch Flora und Fauna	Ja	
3.1.3.2.1	Translokation	Ja	
3.1.3.2.2	Tierischer Metabolismus	Ja	
3.1.4	Kreisläufe und Verteilung von Material in nicht-lebendigen Komponenten	Ja	
3.1.4.1	Transport über die Atmosphäre	Nein	

Tabelle 11a: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
3.1.4.1.1	Verdunstung	Nein	
3.1.4.1.2	Gastransport	Ja	¹⁴ C
3.1.4.1.3	Aerosol-Formation und Transport	Ja	Inhalationspfad
3.1.4.1.4	Niederschlag	Nein	Regen ist nicht kontaminiert
3.1.4.1.5	Auswaschung und feuchte Ablagerung	Nein	
3.1.4.1.6	Trockene Ablagerung	Nein	
3.1.4.2	Transport über Wasser	Ja	Radionuklidtransport über Grundwasser
3.1.4.2.1	Infiltration	Nein	
3.1.4.2.2	Perkolation	Nein	
3.1.4.2.3	Kapillarer Aufstieg	Nein	
3.1.4.2.4	Grundwassertransport	Ja	Primärer Transportweg
3.1.4.2.5	Multiphasen-Fluss	Nein	
3.1.4.2.6	Oberflächenabfluss	Nein	
3.1.4.2.7	Abfluss	Ja	Über Brunnen
3.1.4.2.8	Zufluss	Nein	
3.1.4.2.9	Transport in Oberflächengewässern	Ja	Im Fischmodell
3.1.4.2.10	Erosion	Nein	Kann integriert werden
3.1.4.3	Transport über feste Stoffe	Ja	Staubbelastung in der Luft, externe Exposition
3.1.4.3.1	Erdbeben und Steinschlag	Nein	
3.1.4.3.2	Sedimentation	Ja	Im Fischmodell
3.1.4.3.3	Sedimentaufschwemmung	Ja	Im Fischmodell
3.1.4.3.4	Regenspritzer	Nein	
3.1.4.4	Physikochemische Änderungen	Ja	
3.1.4.4.1	Auflösung und Ausfällung	Nein	
3.1.4.4.2	Adsorption und Desorption	Nein	
3.1.4.4.3	Kolloidbildung	Nein	

Tabelle 11a: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
3.2	Ereignisse und Vorgänge im Zusammenhang mit menschlicher Aktivität	Ja	
3.2.1	Chemische Änderungen	Nein	
3.2.1.1	Künstliche Düngung	Nein	
3.2.1.2	Chemische Verschmutzung	Nein	
3.2.1.3	Saurer Regen	Nein	
3.2.2	Physikalische Änderungen	Ja	
3.2.2.1	Konstruktion	Nein	
3.2.2.2	Wassergewinnung durch Pumpen	Ja	Nutzung von Brunnenwasser
3.2.2.3	Wasseranreicherung durch Pumpen	Nein	
3.2.2.4	Bau von Dämmen	Nein	
3.2.2.5	Landgewinnung	Nein	
3.2.3	Recycling und Durchmischung des Grundmaterials	Ja	
3.2.3.1	Pflügen	Ja	Wird im Ackerland angenommen
3.2.3.2	Versorgung durch Brunnen	Ja	Quelle der Bewässerung
3.2.3.3	Andere Wasserquellen	Nein	
3.2.3.4	Bewässerung	Ja	Ausgleich des Wasserdefizits
3.2.3.5	Recycling von Grundmaterial	Nein	
3.2.3.6	Künstliche Durchmischung der Gewässer	Nein	
3.2.3.7	Ausbaggern	Nein	
3.2.3.8	Kontrollierte Belüftung	Nein	
3.2.4	Umverteilung von Spurenmaterialien	Ja	
3.2.4.1	Wasseraufbereitung	Ja	Wird im Moment nicht angenommen, da der entsprechende Parameter auf 1 gesetzt wurde
3.2.4.2	Luftfilterung	Nein	
3.2.4.3	Nahrungsmittelverarbeitung	Nein	

Tabelle 11a: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
4.	FEPs zur Exposition des Menschen	Ja	
4.1	Menschliche Gewohnheiten	Ja	Abhängig von Referenzklima
4.1.1	Ressourcenverbrauch	Ja	Trinkwasser- und Nahrungsmittel-aufnahme
4.1.1.1	Landwirtschaftliche Ressourcen	Ja	Nutzpflanzen
4.1.1.2	Tierische Nahrungsmittel	Ja	Fleisch und Milch
4.1.1.3	Viehfutter	Ja	Gras, Mais, Getreide und Wasser
4.1.1.4	Natürliche Nahrungsquellen Nicht-	Ja	Süßwasserfisch
4.1.1.5	nahrungsmittelbezogene Verwendung von Biosphären-Produkten	Nein	
4.1.1.6	Wasser	Ja	Trinkwasser Mensch und Tier
4.1.2	Lagerung von Produkten	Nein	
4.1.3	Örtlichkeit	Ja	Verschiedene Referenzstationen
4.1.4	Ernährung	Ja	Abhängig von Referenzklima
4.2	Externe Bestrahlung	Ja	
4.2.1	Externe Bestrahlung aus der Atmosphäre	Nein	
4.2.2	Externe Bestrahlung aus dem Boden	Ja	
4.2.3	Externe Bestrahlung aus dem Wasser	Nein	
4.2.4	Externe Bestrahlung aus Sedimenten	Nein	
4.2.5	Externe Bestrahlung durch nicht-Nahrungsmittel	Nein	
4.2.6	Externe Bestrahlung durch Flora und Fauna	Nein	
4.3	Interne Exposition	Ja	
4.3.1	Inhalation	Ja	

Tabelle 11a: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
4.3.2	Innere Aufnahme	Ja	
4.3.2.1	Getränke	Ja	
4.3.2.2	Nahrungsmittelverarbeitung	Nein	
4.3.2.3	Boden und Sedimente	Nein	
4.3.3	Aufnahme über die Haut	Nein	

Tabelle 11b: Änderungen der Haupt-FEP Liste für die Tundra Referenzklimaregion Vardo ohne Landwirtschaft mit selbstversorgender Jäger und Sammler Population.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
1.6	Quellgröße	Ja	
1.6.1	Geosphären/Biosphären Schnittstelle	Ja	Oberflächenwasser landwirtschaftliche Böden
1.6.2	Abgabemechanismus	Ja	Oberflächenwasser landwirtschaftliche Böden
1.6.3	Quellgrößen Eigenschaften	Ja	Oberflächenwasser 1Bq/l landwirtschaftliche Böden 1Bq/kg
2.3	Grenzsysteme	Ja	Tundra
2.3.1	Umgebungstypen	Ja	Tundra
2.3.1.1	Natürliche und Quasi-natürliche Lebensräume	Ja	Tundra Jagd und Sammeln von Nahrungsmitteln
2.3.1.2	Landwirtschaftliche Lebensräume	Ja	Viehzucht

Tabelle 11b: Fortsetzung.

FEP Nummer	FEP Name	Berücksichtigt (Ja/Nein)	Kommentar
3.1.4.2.4	Grundwassertransport	Nein	Dringt nicht durch Permafrost, deswegen kein Einfluss auf Biosphärenmodell
3.1.4.2.8	Abfluss	Nein	Akkumuliert möglicherweise unter Permafrost
3.2.2.2	Wassergewinnung durch Pumpen	Nein	Oberflächenwasser wird als Trinkwasser genutzt
3.2.3.2	Versorgung durch Brunnen	Nein	
3.2.3.4	Bewässerung	Nein	
4.1.1.1	Landwirtschaftliche Ressourcen	Nein	
4.1.1.2	Tierische Nahrungsmittel	Ja	Süßwasserfisch und Rentierfleisch
4.1.1.4	Natürliche Nahrungsquellen	Ja	Süßwasserfisch, Rentierfleisch, Beeren und Pilze

9.2: Parameter

Tabelle 12: Futtermittelverbrauch von Nutztieren [kg/d] (KTBL, 2009; Pröhl et al., 2004b).

	Marrakesch	Rom	Valladolid	Santander	Deutschland	Rostow	Turku	Sodankylä	Vardo
Milchkuh [kg/d]									
Grass	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Mais	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Getreide	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wasser	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Rind [kg/d]									
Grass	25	25	25	0	0	25	50	50	
Mais	10	10	10	25	25	10	0	0	
Getreide	0	0	0	0	0	0	1	1	
Wasser	40	40	60	60	40	40	40	40	
Schwein [kg/d]									
Grass	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mais	0	0	0	0	0	0	0	0	
Getreide	4	4	4	4	4	4	4	4	
Wasser	8	8	8	8	8	8	8	8	
Schaf [kg/d]									
Grass	5	5	5	5	5	5	5	5	
Mais	0	0	0	0	0	0	0	0	
Getreide	0	0	0	0	0	0	0	0	
Wasser	4	4	4	4	4	4	4	4	
Geflügel [kg/d]									
Grass	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mais	0	0	0	0	0	0	0	0	
Getreide	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
Wasser	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
Rentier [kg/d]									
Grass									70
Mais									0
Getreide									0
Wasser									40

Tabelle 13: Subtropisches Klima Transferfaktoren Boden-Pflanze (IAEA, 2009, 2010)

	Boden	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffel	Obst
Cs	Alle	3.1E-03	1.9E-02	2.5E-01	3.8E-02		6.5E-02	2.0E-02
	Sand				1.0E-02		1.5E-01	
	Lehm	2.5E-03	2.5E-02	2.7E-01	4.1E-02		4.2E-02	2.1E-01
	Ton		7.3E-03		8.0E-03	5.0E-03	4.7E-02	1.7E-02
I		1.5E-04	1.2E-03				5.6E-02	
	Sand				3.5E-02			
Pu			8.2E-04		1.1E-03		1.5E-03	
Tc		3.0E-02	3.0E-01		7.2E-01		5.0E-01	

Tabelle 14: Gemäßigtes Klima Transferfaktor Sand-Pflanze (IAEA, 2009, 2010; Staven et al., 2003).

	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffeln	Früchte
Ac-227	2.7E-05	3.9E-04	3.3E-02	5.3E-05	2.6E-04	2.1E-04	2.5E-04
Am-243	2.7E-05	3.9E-04	3.3E-02	5.3E-05	2.6E-04	2.1E-04	2.5E-04
Cl-36	2.5E+01	2.0E+00	2.0E+00	1.6E+01	2.0E+00	2.0E+00	7.0E+01
Cm-244	2.3E-05	2.9E-04	2.1E-03	1.9E-03	2.0E-04	1.5E-04	1.5E-05
Cs-135	3.9E-02	3.5E-02	8.4E-02	1.2E-02	4.9E-02	9.3E-02	2.2E-01
I-129	5.8E-03	1.0E-01	1.8E-03	4.0E-02	1.0E-01	1.0E-01	4.0E-02
Nb-94	1.4E-02	8.0E-03	2.0E-02	1.7E-02	4.0E-03	4.0E-03	2.5E-02
Ni-59	3.7E-02	5.0E-03	2.6E-02	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Ni-63	3.7E-02	5.0E-03	2.6E-02	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Np-237	3.5E-03	1.8E-02	3.1E-02	2.7E-02	4.8E-03	5.8E-03	1.0E-02
Pa-231	2.0E-04	1.0E-04	5.0E-04	3.0E-04	2.0E-04	1.0E-04	2.5E-04
Pb-210	1.1E-02	1.5E-02	3.1E-01	7.3E-02	1.2E-03	6.4E-03	7.7E-03
Pd-107	3.0E-02	5.0E-03	3.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	5.0E-03	4.0E-02
Po-210	2.4E-04	1.9E-04	1.2E-01	7.4E-03	2.4E-04	2.7E-03	1.2E-03
Pu-239	1.0E-05	6.5E-05	1.6E-04	1.1E-04	3.0E-06	1.0E-04	4.5E-05
Ra-226	1.7E-02	2.2E-03	1.4E-01	9.1E-01	2.4E-03	1.1E-02	1.2E-02
Se-79	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02	3.0E-03	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02
Sn-126	5.0E-03	1.0E-03	5.0E-03	3.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	6.0E-03
Tc-99	1.3E+00	3.0E-01	7.6E+01	1.1E+02	3.8E+00	3.9E-01	1.5E+00
Th-230	4.4E-03	7.8E-04	4.2E-02	1.2E-03	6.4E-05	2.0E-04	6.3E-03
Th-232	4.4E-03	7.8E-04	4.2E-02	1.2E-03	6.4E-05	2.0E-04	6.3E-03
U-238	8.9E-03	1.9E-02	1.6E-02	1.7E-01	1.5E-02	1.9E-02	1.2E-02
Zr-93	1.0E-03	4.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	5.0E-04	4.0E-03	1.0E-03

Tabelle 15: Gemäßigtes Klima Transferfaktor für Lehm-Pflanze (IAEA, 2009, 2010; Staven et al., 2003).

	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffeln	Früchte
Ac-227	4.0E-04	3.6E-04	3.3E-02	1.6E-04	2.6E-04	1.5E-04	2.5E-04
Am-243	4.0E-04	3.6E-04	3.3E-02	1.6E-04	2.6E-04	1.5E-04	2.5E-04
Cl-36	4.7E+01	2.0E+00	2.0E+00	2.5E+01	2.0E+00	2.0E+00	7.0E+01
Cm-244	2.3E-05	3.2E-04	8.3E-04	1.4E-03	2.0E-04	1.5E-04	1.5E-05
Cs-135	2.0E-02	3.3E-02	4.8E-02	7.4E-02	1.6E-02	3.5E-02	2.2E-01
I-129	3.6E-04	1.0E-01	3.7E-03	4.1E-03	1.0E-01	1.0E-01	4.0E-02
Nb-94	1.4E-02	8.0E-03	2.0E-02	1.7E-02	4.0E-03	4.0E-03	2.5E-02
Ni-59	7.6E-03	5.0E-03	1.1E-01	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Ni-63	7.6E-03	5.0E-03	1.1E-01	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Np-237	8.5E-04	1.8E-02	3.1E-02	2.7E-02	4.8E-03	5.7E-03	1.0E-02
Pa-231	2.0E-04	1.0E-04	5.0E-04	3.0E-04	2.0E-04	1.0E-04	2.5E-04
Pb-210	1.1E-02	1.5E-02	3.1E-01	8.2E-01	1.2E-03	5.2E-04	7.7E-03
Pd-107	3.0E-02	5.0E-03	3.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	5.0E-03	4.0E-02
Po-210	2.4E-04	1.9E-04	1.2E-01	7.4E-03	2.4E-04	2.7E-03	1.2E-03
Pu-239	4.9E-06	6.5E-05	1.6E-04	2.8E-04	3.0E-06	1.5E-04	4.5E-05
Ra-226	2.9E-02	4.8E-02	2.6E-01	1.2E-01	1.7E-03	1.2E-02	1.2E-02
Se-79	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02	3.0E-03	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02
Sn-126	5.0E-03	1.0E-03	5.0E-03	3.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	6.0E-03
Tc-99	1.3E+00	3.0E-01	7.6E+01	2.5E+02	3.8E+00	9.4E-02	1.5E+00
Th-230	4.4E-03	2.0E-04	4.2E-02	8.6E-04	2.0E-04	2.5E-04	6.3E-03
Th-232	4.4E-03	2.0E-04	4.2E-02	8.6E-04	2.0E-04	2.5E-04	6.3E-03
U-238	7.7E-03	2.3E-02	9.8E-03	4.3E-02	1.5E-02	2.8E-02	1.2E-02
Zr-93	1.0E-03	4.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	5.0E-04	4.0E-03	1.0E-03

Tabelle 16: Gemäßigtes Klima Transferfaktor Ton-Pflanze (IAEA, 2009, 2010; Staven et al., 2003).

	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffeln	Früchte
Ac-227	1.6E-05	3.6E-04	3.3E-02	2.7E-04	2.6E-04	3.3E-03	2.5E-04
Am-243	1.6E-05	3.6E-04	3.3E-02	2.7E-04	2.6E-04	3.3E-03	2.5E-04
Cl-36	3.7E+01	2.0E+00	2.0E+00	4.5E+01	2.0E+00	2.0E+00	7.0E+01
Cm-244	2.3E-05	3.2E-04	2.5E-04	1.4E-03	2.0E-04	1.5E-04	1.5E-05
Cs-135	1.1E-02	9.1E-03	1.2E-02	1.8E-02	1.2E-02	2.5E-02	2.2E-01
I-129	5.7E-04	1.0E-01	8.7E-03	4.6E-03	1.0E-01	1.0E-01	4.0E-02
Nb-94	1.4E-02	8.0E-03	2.0E-02	1.7E-02	4.0E-03	4.0E-03	2.5E-02
Ni-59	3.2E-02	5.0E-03	2.5E-01	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Ni-63	3.2E-02	5.0E-03	2.5E-01	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Np-237	3.9E-05	1.8E-02	3.1E-02	2.7E-02	4.8E-03	5.7E-03	1.0E-02
Pa-231	2.0E-04	1.0E-04	5.0E-04	3.0E-04	2.0E-04	1.0E-04	2.5E-04
Pb-210	1.1E-02	1.5E-02	3.1E-01	2.8E-02	1.2E-03	1.5E-03	7.7E-03
Pd-107	3.0E-02	5.0E-03	3.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	5.0E-03	4.0E-02
Po-210	2.4E-04	1.9E-04	1.2E-01	7.4E-03	2.4E-04	2.7E-03	1.2E-03
Pu-239	7.4E-06	6.5E-05	1.6E-04	8.3E-05	3.0E-06	3.6E-04	4.5E-05
Ra-226	3.9E-02	2.2E-02	4.2E-02	4.0E-02	1.4E-03	5.4E-03	1.2E-02
Se-79	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02	3.0E-03	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02
Sn-126	5.0E-03	1.0E-03	5.0E-03	3.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	6.0E-03
Tc-99	1.3E+00	3.0E-01	7.6E+01	1.8E+02	3.8E+00	2.3E-01	1.5E+00
Th-230	4.4E-03	1.5E-05	4.2E-02	4.9E-04	1.5E-05	9.6E-05	6.3E-03
Th-232	4.4E-03	1.5E-05	4.2E-02	4.9E-04	1.5E-05	9.6E-05	6.3E-03
U-238	3.8E-03	1.8E-02	1.7E-02	3.6E-03	1.5E-02	9.2E-04	1.2E-02
Zr-93	1.0E-03	4.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	5.0E-04	4.0E-03	1.0E-03

Tabelle 17: Gemäßigtes Klima Transferfaktor Boden-Pflanze für organische Böden (IAEA, 2009, 2010; Staven et al., 2003).

	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffeln	Früchte
Ac-227	1.5E-07	3.6E-04	3.3E-02	1.4E-04	2.6E-04	6.7E-04	2.5E-04
Am-243	1.5E-07	3.6E-04	3.3E-02	1.4E-04	2.6E-04	6.7E-04	2.5E-04
Cl-36	3.6E+01	2.0E+00	2.0E+00	2.6E+01	2.0E+00	1.2E+01	7.0E+01
Cm-244	2.3E-05	3.2E-04	1.0E-03	1.4E-03	2.0E-04	1.5E-04	1.5E-05
Cs-135	4.3E-02	2.3E-02	2.8E-01	2.3E-02	1.4E-01	5.9E-02	2.2E-01
I-129	6.3E-04	1.0E-01	3.7E-03	6.5E-03	1.0E-01	7.7E-03	4.0E-02
Nb-94	1.4E-02	8.0E-03	2.0E-02	1.7E-02	4.0E-03	1.7E-02	2.5E-02
Ni-59	6.1E-03	5.0E-03	2.4E-02	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Ni-63	6.1E-03	5.0E-03	2.4E-02	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-03	6.0E-02
Np-237	9.7E-05	1.8E-02	3.1E-02	2.7E-02	4.8E-03	2.2E-02	1.0E-02
Pa-231	2.0E-04	1.0E-04	5.0E-04	3.0E-04	2.0E-04	1.0E-04	2.5E-04
Pb-210	1.1E-02	1.5E-02	3.1E-01	8.0E-02	1.2E-03	1.5E-03	7.7E-03
Pd-107	3.0E-02	5.0E-03	3.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	5.0E-03	4.0E-02
Po-210	2.4E-04	1.9E-04	1.2E-01	7.4E-03	2.4E-04	2.7E-03	1.2E-03
Pu-239	5.4E-04	6.5E-05	1.6E-04	2.7E-05	3.0E-06	3.9E-04	4.5E-05
Ra-226	1.7E-02	1.7E-02	1.3E-01	4.9E-02	2.4E-03	7.0E-02	1.2E-02
Se-79	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02	3.0E-03	2.0E-02	3.0E-03	5.0E-02
Sn-126	5.0E-03	1.0E-03	5.0E-03	3.0E-03	5.0E-03	1.0E-03	6.0E-03
Tc-99	1.3E+00	3.0E-01	7.6E+01	1.8E+02	1.7E+01	2.3E-01	1.5E+00
Th-230	2.1E-03	7.8E-04	4.2E-02	1.2E-03	6.4E-05	8.0E-04	6.3E-03
Th-232	2.1E-03	7.8E-04	4.2E-02	1.2E-03	6.4E-05	8.0E-04	6.3E-03
U-238	6.2E-03	1.5E-02	1.7E-02	1.8E-01	1.5E-02	5.0E-03	1.2E-02
Zr-93	1.0E-03	4.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	5.0E-04	4.0E-03	1.0E-03

Tabelle 18: Boreales Klima Transferfaktor Boden-Pflanze für Cäsium (Paasikallio et al., 1994; Rosen, 1996; Rosen et al., 1996).

	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffel	Obst
Sand	3.1E-02			5.2E-01		8.1E-02	
Lehm	3.3E-01		1.1E+01	6.5E-02		3.9E-02	
Ton	1.4E-02		8.2E-01	6.5E-02		3.9E-02	
Organisch	3.2E-01		3.3E+00	4.1E-01		8.2E-02	

Tabelle 19: Transferfaktoren für Beeren und Pilze für alle Böden (Pröhl et al., 2004a).

Beeren	Pilze
1.0E-04	1.0E-04
1.0E-04	1.0E-04
2.0E+00	2.0E+00
1.0E-04	1.0E-04
2.0E-02	5.0E-02
1.0E-02	1.0E-02
5.0E-04	2.0E-03
5.0E-03	5.0E-03
5.0E-03	5.0E-03
2.0E-03	2.0E-03
1.0E-04	3.0E-04
5.0E-03	2.0E-02
5.0E-03	2.0E-02
1.0E-04	3.0E-04
1.0E-05	1.0E-04
1.0E-02	1.0E-02
3.0E-03	3.0E-03
1.0E-03	3.0E-03
3.0E-01	1.0E+00
2.0E-04	1.0E-04
2.0E-04	1.0E-04
1.0E-03	5.0E-03
4.0E-04	4.0E-04

Tabelle 20: Translokationsfaktor (Müller und Pröhl, 1993).

	Getreide	Fruchtgemüse	Gras	Blattgemüse	Mais	Kartoffel	Obst	Beeren	Pilze
Ac-227	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Am-243	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Cl-36	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Cm-244	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Cs-135	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
I-129	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Nb-94	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Ni-59	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Ni-63	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Np-237	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Pa-231	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Pb-210	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Pd-107	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Po-210	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Pu-239	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Ra-226	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Se-79	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Sn-126	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Tc-99	0.09	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	1
Th-230	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Th-232	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
U-238	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1
Zr-93	0.005	0.0033	1	1	1	0	0.0033	0.0033	1

Tabelle 21: Sonstige Parameter (Pröhl et al., 2004b).

Name	Einheit	Wert
Tiefe des Gewässers	m	3
Umwälzungsrate	1/a	2
Konzentrationsverhältnis behandeltes, unbehandeltes Wasser		1
Jährliche Sedimentation	kg/m ² a	5
Verweildauer auf kontaminiertem Land	s/a	3.6E+06
Abwitterungskonstante	1/d	0,0495

Tabelle 22: Sonstige element- und radionuklidabhängige Parameter.

Name	Konzentrations Faktor Wasser-Fisch	Dosiskoeffizient Nahrungsaufnahme Kleinkind	Dosiskoeffizient Nahrungsaufnahme Kind	Dosiskoeffizient Nahrungsaufnahme Erwachsener	Dosiskoeffizient Inhalation Kleinkind	Dosiskoeffizient Inhalation Kind	Dosiskoeffizient Inhalation Erwachsener	Dosiskoeffizient Extern alle Altersgruppen	Faktor für Tochternuclide	Verteilungskoeffizient Wasser-Sediment
Quelle	AVV 2005	AVV 2005	AVV 2005	AVV 2005	AVV 2005	AVV 2005	AVV 2005	AVV 2005	Pröhl 2004	Cough- trey 1983 Till 2008
Einheit	m ³ /kg	Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/Bq	Sv/ Bq			Sv/ Bq pro Bq/ m ²		m ³ /kg
Ac-227	100	3.1E-06	1.5E-06	1.1E-06	2.0E-04	8.7E-05	7.2E-05	3.6E-16	1	30
Am-243	30	3.7E-07	2.2E-07	2.0E-07	6.8E-05	4.0E-05	4.1E-05	2.0E-16	1	30
Cl-36	50	6.3E-09	1.9E-09	9.3E-10	2.6E-08	1.0E-08	7.3E-09	0.0E+00	1	0.1
Cm-244	25	2.9E-07	1.4E-07	1.2E-07	3.8E-05	1.7E-05	1.3E-05	7.0E-19	1	30
Cs-135	1000	2.3E-09	1.7E-09	2.0E-09	9.9E-10	6.1E-10	6.9E-10	0.0E+00	1	10
I-129	10	2.2E-07	1.9E-07	1.1E-07	8.6E-08	6.7E-08	3.6E-08	2.0E-17	1	10
Nb-94	200	9.7E-09	3.4E-09	1.7E-09	3.7E-08	1.6E-08	1.1E-08	1.5E-15	1	30
Ni-59	100	3.4E-10	1.1E-10	6.3E-11	1.5E-09	5.9E-10	4.4E-10	3.1E-19	1	30
Ni-63	100	8.4E-10	2.8E-10	1.5E-10	4.3E-09	1.7E-09	1.3E-09	0.0E+00	1	30
Np-237	30	2.1E-07	1.1E-07	1.1E-07	4.0E-05	2.2E-05	2.3E-05	2.1E-16	1	30
Pa-231	10	1.3E-06	9.2E-07	7.1E-07	2.3E-04	1.5E-04	1.4E-04	2.2E-16	2.69	30
Pb-210	60	3.6E-06	1.9E-06	6.9E-07	1.8E-05	7.2E-06	5.6E-06	2.3E-18	1	30
Pd-107	10	2.8E-10	8.1E-11	3.7E-11	5.0E-10	1.5E-10	8.5E-11	0.0E+00	1	30
Po-210	300	8.8E-06	2.6E-06	1.2E-06	1.4E-05	5.9E-06	4.3E-06	0.0E+00	1	30
Pu-239	30	4.2E-07	2.7E-07	2.5E-07	7.7E-05	4.8E-05	5.0E-05	3.2E-19	1	30
Ra-226	70	9.6E-07	8.0E-07	2.8E-07	1.1E-05	4.9E-06	3.5E-06	1.6E-15	2.25	30
Se-79	200	2.8E-08	1.4E-08	2.9E-09	1.1E-08	4.9E-09	2.6E-09	0.0E+00	1	0.1
Sn-126	3000	3.0E-08	9.8E-09	4.7E-09	1.0E-07	4.1E-08	2.8E-08	1.9E-15	1.1	30
Tc-99	15	4.8E-09	1.3E-09	6.4E-10	1.3E-08	5.7E-09	4.0E-09	0.0E+00	1	0.1
Th-230	100	4.1E-07	2.4E-07	2.1E-07	7.4E-05	4.3E-05	4.3E-05	1.7E-17	1.12	30
Th-232	100	4.5E-07	2.9E-07	2.3E-07	5.0E-05	2.6E-05	2.5E-05	1.8E-15	1	30
U-238	50	1.2E-07	6.8E-08	4.8E-08	9.4E-06	4.0E-06	2.9E-06	2.3E-17	1.06	30
Zr-93	200	7.6E-10	5.8E-10	1.1E-09	3.1E-09	4.1E-09	1.0E-08	4.6E-19	1.05	10

Tabelle 23: Sonstige element- und radionuklidabhängige Parameter Fortsetzung.

Name	Halbwertszeit	Anreicherungsfaktor	Effektive Dicke	Transferfaktor Futter-Milch	Transferfaktor Futter-Rindfleisch	Transferfaktor Futter-Schweinefleisch	Transferfaktor Futter-Schafffleisch	Transferfaktor Futter-Geflügelfleisch	Transferfaktor Futter-Eier	Transferfaktor Futter-Rentierfleisch
Quelle	StrlSchV 2001		Pröhl 2004	IAEA 2009 Staven 2003	IAEA 2009 Staven 2003	IAEA 2009 Staven 2003	IAEA 2009 Staven 2003	IAEA 2009 Staven 2003	IAEA 2009 Staven 2003	IAEA 2009 Staven 2003
Einheit	a		m							
Ac-227	2.2E+01	4	0.031	2.0E-05	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03
Am-243	7.4E+03	4	0.031	2.0E-05	1.0E-04	3.0E-04	1.0E-03	6.0E-03	3.0E-03	1.0E-04
Cl-36	3.0E+05	1	0	2.0E-02	2.0E-02	3.0E-01	3.0E-01	2.7E+00	6.0E+00	2.0E-02
Cm-244	1.8E+01	4	0.044	2.0E-05	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04
Cs-135	2.0E+06	3	0	5.0E-03	2.0E-02	4.0E-01	5.0E-01	2.7E+00	4.0E-01	2.0E-02
I-129	1.6E+07	1	0.003	3.0E-03	1.5E-02	3.0E-02	3.0E-02	8.7E-03	2.4E+00	1.5E-02
Nb-94	2.0E+04	3	0.044	3.0E-03	1.0E-06	3.0E-06	1.0E-05	3.0E-04	1.0E-03	1.0E-06
Ni-59	7.5E+04	1	0.005	1.0E-02	5.0E-03	1.0E-02	5.0E-02	9.7E+00	2.0E-01	5.0E-03
Ni-63	1.0E+02	1	0	1.0E-02	5.0E-03	1.0E-02	5.0E-02	9.7E+00	2.0E-01	5.0E-03
Np-237	2.1E+06	3	0.035	5.0E-06	1.0E-04	3.0E-04	1.0E-03	7.5E-01	1.1E+00	1.0E-04
Pa-231	3.3E+04	3	0.03	3.0E-03	1.0E-05	3.0E-05	1.0E-04	7.5E-01	1.1E+00	1.0E-05
Pb-210	2.2E+01	3	0.031	3.0E-04	7.0E-04	4.0E-04	7.1E-03	4.0E-04	4.0E-04	4.0E-04
Pd-107	6.5E+06	3	0	1.0E-02	1.0E-03	3.0E-03	1.0E-02	9.7E+00	2.0E-01	1.0E-03
Po-210	3.8E-01	3	0.031	3.0E-04	5.0E-03	5.0E-03	5.0E-03	2.4E+00	5.0E-03	5.0E-03
Pu-239	2.4E+04	3	0.005	1.0E-07	1.0E-04	3.0E-04	1.0E-03	2.0E-05	1.2E-03	1.0E-04
Ra-226	1.6E+03	3	0.044	3.0E-03	3.0E-03	2.0E-03	5.0E-04	1.0E+00	1.0E+00	3.0E-03
Se-79	6.5E+04	1	0	5.0E-02	5.0E-03	1.0E-02	5.0E-02	9.7E+00	1.6E-01	5.0E-03
Sn-126	1.0E+05	1	0.042	3.0E-03	1.0E-03	3.0E-03	1.0E-02	7.5E-02	1.0E+00	1.0E-03
Tc-99	2.1E+05	1	0	1.0E-05	5.0E-04	1.0E-03	5.0E-03	1.3E-01	1.0E+00	5.0E-04
Th-230	7.5E+04	3	0.01	2.0E-03	1.0E-05	3.0E-05	1.0E-04	7.5E-01	5.0E-01	1.0E-05
Th-232	1.4E+10	3	0	2.0E-03	1.0E-05	3.0E-05	1.0E-04	7.5E-01	5.0E-01	1.0E-05
U-238	4.4E+09	3	0.03	3.0E-03	1.0E-04	3.0E-04	1.0E-03	7.5E-01	1.1E+00	1.0E-04
Zr-93	1.5E+06	3	0	5.0E-06	1.0E-06	5.0E-06	1.0E-05	6.0E-05	2.0E-04	1.0E-06

Tabelle 24: Wachstumsperioden für Pflanzen (Pröhl und Müller, 1996).

	Gras	Mais	Getreide	Kartoffeln	Blattgemüse	Fruchtgemüse	Obst
Marrakesch	Okt-Mai	Feb-Jun	Feb-Jun	Jan-Mai	Feb-Jun	Jan-Jun	Jan-Jun
Rom	Mar-Okt	Mai-Sep	Apr-Aug	Mai-Sep	Jan-Dez	Apr-Okt	Apr-Okt
Rostow	Mai-Sep	Mai-Aug	Mai-Aug	Mai-Sep	Mai-Sep	Mai-Sep	Mai-Sep
Valladolid	Mar-Okt	Mai-Sep	Apr-Aug	Mai-Sep	Jan-Dez	Apr-Okt	Apr-Okt
Deutschland	Mar-Okt	Mai-Sep	Apr-Aug	Mai-Sep	Jan-Dez	Apr-Okt	Apr-Okt
Santander	Mar-Okt	Mai-Sep	Apr-Aug	Mai-Sep	Jan-Dez	Apr-Okt	Apr-Okt
Turku	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug
Sodankylä	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug	Jun-Aug
Vardo	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 25: Landwirtschaftliche Erträge von Nutzpflanzen in kg/m² und Jahr (FAO, 2010; Statistisches-Bundesamt, 2010)

[kg/m ² a]	Finland	Deutschland	Italien	Marokko	Russische Föderation	Spanien
	Turku Sodankylä	Magdeburg Hannover Ulm	Rom	Marrakesch	Rostow	Santander Valladolid
Gras	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Mais	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Getreide	0,4	0,7	0,5	0,1	0,2	0,3
Wurzeln und Knollen	2,8	4,4	2,5	2,4	1,4	2,9
Gemüse	2,8	3,1	2,6	2,8	1,9	3,8
Früchte	2	2	2	2	2	2

Tabelle 26: Multiplikatoren der Verzehrparameter für alle Altersgruppen berechnet aus den Parametern der StrISchV für drei von der ICRP definierten Altersgruppen (StrISchV, 2008).

	Kleinkind	Kind	Erwachsener
Alter nach ICRP 101	0-5 Jahre	6-15 Jahre	16-70 Jahre
Entspricht Alter nach StrISchV	1-2 Jahre	7-17 Jahre	>17 Jahre
Trinkwasser	0.29	0.43	1.00
Milch	1.23	1.31	1.00
Fisch	0.40	0.60	1.00
Süßwasserfisch	0.40	0.60	1.00
Rindfleisch	0.14	0.72	1.00
Schweinefleisch	0.14	0.72	1.00
Geflügel	0.14	0.72	1.00
Lamm	0.14	0.72	1.00
Eier	0.14	0.72	1.00
Getreide	0.27	0.86	1.00
Früchte	1.29	1.86	1.00
Kartoffeln	0.73	1.00	1.00
Blattgemüse	0.46	0.69	1.00

Tabelle 27: Bewässerungsraten für die verschiedenen Pflanzensorten und Referenzklimaregionen in Litern pro Quadratmeter und Jahr. In dem Modell wurden für Kartoffeln, sowie für Frucht und Blattgemüse die Bewässerungsraten in Gewächshäusern verwendet.

$l/m^2 a$	Marrakesch	Rom	Valladolid	Santander	Weser/Aller	Donau	Elbe	Rostow	Turku	Sodankyla	Vardo	Magdeburg 1900	Gewächshaus
Getreide	527	532	486	101	90	11	194	406	92	33	0	184	
Obst	552	610	613	101	90	11	228	477	92	33	0	197	
Fruchtgemüse	552	610	613	101	90	11	228	477	92	33	0	197	550
Gras	611	610	617	101	90	11	228	477	92	33	0	197	
Blattgemüse	527	610	617	101	90	11	228	477	92	33	0	197	350
Mais	527	610	542	101	90	11	228	406	92	0	0	197	
Kartoffeln	360	610	542	101	78	11	228	477	92	33	0	197	420
Mittelwert	522	599	576	101	88	11	223	457	92	28	0	195	

10: Danksagung

Besonderer Dank gilt Dr. Gerhard Pröhl (IAEA) für seine Bereitschaft für den Start des Projektes und vorbereitende Arbeiten sowie für fachliche Diskussionen während der gesamten Laufzeit dieses Vorhabens.

Bei Dr. Heinz Müller und Dr. Irene Fiedler (ISS) möchten wir uns für wertvolle Hinweise zur Erstellung des Berichtes bedanken.

Frau Angela Becker (GRS) danken wir für die Bereitstellung der klimatischen Daten aus dem BIOCLIM Projekt.

Bei den Mitgliedern des BIOPROTA Projektes, sowie den Fachkollegen vom BfS, der Universität Bremen und der GRS möchten wir uns für wertvolle fachliche Diskussionen und Anregungen bedanken.

Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe "Environmental Modelling for Radiation Safety" (EMRASII) WG 3" organisiert von der International Atomic Energy Agency (IAEA), Wien für fruchtbare Diskussionen. Besonderer Dank gilt:

Gerhard Pröhl, Head, Assessment & Management of Environmental Releases Unit Waste & Environmental Safety Section Division of Radiation, Transport & Waste Safety International Atomic Energy Agency (IAEA)

Tobias Lindborg, Swedish Nuclear Fuel & Waste Management Company (SKB), SWEDEN

Sten Berglund, Swedish Nuclear Fuel & Waste Management Company (SKB), SWEDEN

Ari T.K. Ikonen, Posiva Oy, FINLAND

Ulrik Kautsky, Swedish Nuclear Fuel & Waste Management Company (SKB), SWEDEN

Sven Keesmann, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA), SWITZERLAND

Gerald Kirchner, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), GERMANY

Ryk Klos, Aleksandria Sciences, UNITED KINGDOM

Laura M.C. Limer, Limer Scientific Consulting Limited, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

Graham M. Smith, GMS Abingdon Limited, UNITED KINGDOM

11: Literatur

- Absalom, J., Young, S., Crout, N., Sanchez, A., Wright, S., Smolders, E., Nisbet, A., Gillett, A., 2001. Predicting the transfer of radiocaesium from organic soils to plants using soil characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity* 52, 31-43.
- Achtnich, W., 1980. *Bewässerungslandbau. Agrotechnische Grundlagen der Bewässerungswirtschaft.* Eugen Ulmer Stuttgart.
- Albrecht, A., Schultze, U., Liedgens, M., Flühler, H., Frossard, E., 2002. Incorporating soil structure and root distribution into plant uptake models for radionuclides: toward a more physically based transfer model. *Journal of Environmental Radioactivity* 59, 329-350.
- Andersson, E., 2010. The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp, SKB TR-10-02.
- Andersson, I., Lönsjö, H., Rosen, K., 2001. Long-term studies on transfer of ^{137}Cs from soil to vegetation and to grazing lambs in a mountain area in Northern Sweden. *Journal of Environmental Radioactivity* 52, 45-66.
- Andersson, P., Beaugelin-Seiller, K., Beresford, N., Copplestone, D., Vedova, C.D., Garnier-Laplace, J., Howard, B., Howe, P., Oughton, D., Wells, C., Whitehouse, P., 2008. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the Environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT (Protection of the Environment from Ionising Radiation in a Regulatory Context). European Commission.
- Andra, 2009a. 2006 - 2009 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage.
- Andra, 2009b. 2009 Activity Report: managing today to prepare for tomorrow.
- Andra, 2010. Making nuclear waste governable: Deep underground disposal and the challenge of reversibility.
- Aquilonius, K., 2010. The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp, SKB TR-10-03.
- Atkinson, C., Webster, A., 2001. The influence of the development of temperate fruit tree species on the potential for their uptake of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity* 52, 131-146.
- Avila, R., Ekström, P., 2006. Development of Landscape Dose Factors for dose assessments in SR-Can TR-06-15. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Avila, R., Ekström, P., Astrand, P., 2010. Landscape dose conversion factors used in the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-06.
- Avila, R., Pröhl, G., 2007. Models for assessment of doses from underground releases of C-14. Posiva Working Report 2007-107. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- Avila, R., Pröhl, G., 2008. Models used in the SFR 1 SAR-08 and KBS-3H safety assessments for calculation of ^{14}C doses R-08-16, in: SKB (Ed.). SKB.
- AVV, 2005. Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen.
- Badri, D., Vivanco, J., 2009. Regulation and function of root exudates. *Plant, Cell and Environment* 32.

- Baeza, A., Guillen, J., Bernedo, J., 2005. Soilfungi transfer coefficients: Importance of the location of mycelium in soil and of the differential availability of radionuclides in soil fractions. *Journal of Environmental Radioactivity* 81, 89-106.
- Baeza, A., Paniagua, J., Rufo, M., Guillen, J., Sterling, A., 2001. Seasonal variations in radionuclide transfer in a Mediterranean grazing-land ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity* 55, 283-302.
- Bannick, C., Engelmann, B., Fendler, R., Frauenstein, J., Ginzky, H., Hornemann, C., Ilvonen, O., Kirschbaum, B., Penn-Bressel, G., Rechenberg, J., Richter, S., Roy, L., Wolter, R., 2008. *Grundwasser in Deutschland*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Becker, A., 2003. 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 BMU – 2003-623
- Beyerle, U., Purtschert, R., W Aeschbach-Hertig, Imboden, D., Loosli, H., Wieler, R., Kipfer, R., 1998. Climate and Groundwater Recharge During the Last Glaciation in an Ice-Covered Region. *Science* 282.
- Beyermann, M., Bünger, T., Gehrcke, K., Obrikat, D., 2009. Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland. BfS.
- BfS, 2005. Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz.
- BGR, 2007. Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland: Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, Hannover/Berlin.
- Biesold, H., Artmann, A., Becker, A., Bürgel, A., 2004. Abschätzung der Konservativität der Annahmen in der AVV zur Berechnung der Strahlenbelastung über den Ingestionspfad BMU – 2004-646.
- BIOCLIM, 2004. Modeling sequential BIOSphere systems under CLIMate change for radioactive waste disposal, EC-Contract FIKW-CT-2000-00024.
- BIOMOVs, 1991. On the Validity of Environmental Transfer., Symposium, Swedish Radiation Protection Institute.
- Brouwer, C., Goffeau, A., Heibloem, M., 1985. *Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 - Introduction to Irrigation*. FAO.
- Brustad, M., Parr, C., Melhus, M., Lund, E., 2007. Dietary Patterns in the Population Living in the Sami Core Areas of Norway - the SAMINOR Study. *International Journal of Circumpolar Health* 67, 84-98.
- Bunzl, K., Kracke, W., 1987. SOIL TO PLANT TRANSFER OF $^{239} + ^{240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{137}Cs AND ^{90}Sr FROM GLOBAL FALLOUT IN FLOUR AND BRAN FROM WHEAT, RYE, BARLEY AND OATS, AS OBTAINED BY FIELD MEASUREMENTS. *The Science of the Total Environment* 63, 111-124.
- Bunzl, K., Kracke, W., 1989. Seasonal variation of soil-to-plant transfer of K and fallout $^{134,137}\text{Cs}$ in peatland vegetation. *Health Physics* 57, 593-600.
- Bunzl, K., Kracke, W., Agapkina, G., Tikhomirov, A., Shcheglov, A.I., 1998. Association of Chernobyl-derived $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{90}Sr and ^{137}Cs with

different molecular size fractions of organic matter in the soil solution of two grassland soils. *Radiat Environ Biophys* 37, 195-200.

Calmon, P., Thiry, Y., Zibold, G., Rantavaara, A., Fesenko, S., 2009. Transfer parameter values in temperate forest ecosystems: a review. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 757-766.

Camps, M., Rigol, A., Hillier, S., Vidal, M., Rauret, G., 2004. Quantitative assessment of the effects of agricultural practices designed to reduce ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr soil-plant transfer in meadows. *Science of the Total Environment* 332, 23-38.

Carini, F., Green, N., Spalla, S., 2006. Radionuclides in fruit systems: A review of experimental studies. *Science of the Total Environment* 359, 188-193.

Chen, Q., Kowe, R., Jones, A., Oatway, W., Mobbs, S., Watson, S., 2004. Development and application of a generic biosphere tool for dose assessments, NRPB EA/13/2004.

Chen, Q., Kowe, R., Mobbs, S., Pröhl, G., Olyslaegers, G., Zeevaert, T., Kanyar, B., Pinedo, P., Simon, I., Bergström, U., Hallberg, B., Jones, J., Oatway, W., Watson, S., 2006. Application of a generic biosphere model for dose assessments to five European sites. *J Radiol Prot* 26, 161-187.

Chen, Z., Grasby, S., Osadetz, K., 2002. Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model. *Journal of Hydrology* 260, 102-117.

Ciscar, J., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Regemorter, D.V., Amelunge, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., 2011. Physical and economic consequences of climate change in Europe. *PNAS* 108, 2678-2683.

Coughtrey, P., Thorne, M., 1983. *Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems*. A.A.Balkema.

DECC, 2008. *A Framework for Implementing Geological Disposal A White Paper* by Defra, BERR and the devolved administrations for Wales and Northern Ireland.

DECC, 2011. *Managing Radioactive Waste Safely: Implementing Geological Disposal Annual Report April 2010 – March 2011*.

Döll, P., Flörke, M., 2005. *Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge* Institute of Physical Geography, Frankfurt University.

Dorp, F.v., Egan, M., Kessler, J., Nilsson, S., Pinedo, P., Smith, G., Torres, C., 1999. Biosphere modelling for the assessment of radioactive waste repositories; the development of a common basis by the BIOMOVs II reference biospheres working group. *Journal of Environmental Radioactivity* 42, 225-236.

Dowdall, M., Gerland, S., Lind, B., 2003. Gamma-emitting natural and anthropogenic radionuclides in the terrestrial environment of Kongsfjord, Svalbard. *The Science of the Total Environment* 305, 229-240.

Dowdall, M., Standring, W., Shaw, G., Strand, P., 2008. Will global warming affect soil-to-plant transfer of radionuclides? *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 1736-1745.

EFSA, 2008. *Kompakte europäische Datenbank über den Verzehr von Lebensmitteln*. European Food Safety Authority.

Ehlikens, S., Kirchner, G., 2002. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of Environmental Radioactivity* 58, 97-112.

EPRI, 2009. Yucca Mountain Total System Performance Assessment Code (IMARC) Version 10: Model Description and Analyses. EPRI, Palo Alto, CA: 2009. 1018712.

Falloon, P., Betts, R., 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation—The importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment* 408, 5667-5687.

FAO, 2001. Human Energy Requirements: Report of a joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation, Rome.

FAO, 2007. FAOSTAT. <http://faostat.fao.org>.

FAO, 2010. FAO Statistical Yearbook 2010.

Förster, B., Fahrenholz, C., Noseck, U., Müller-Lyda, I., 2010. Fachliche Unterstützung des BfS bei der Erstellung von Referenzbiosphärenmodellen für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis von Endlagern – Biosphären-Szenarioanalyse für potentielle Endlagerstandorte AP 2, 3: Analyse der physikalischen Biosphäre in den Referenzregionen in Nordund Süddeutschland.

Garisto, F., Avis, J., Calder, N., D'Andreas, A., Gierszewski, P., Kitson, C., Melnyk, T., Wei, K., Wojciechowski, L., 2004. Third Case Study Defective Container Scenario. Ontario Power Generation Report 06819-REP-01200-10126-R00, Toronto, Kanada.

Geoview, 2011. Topographische Karten. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

Gerzabek, M., Strebl, F., Temmel, B., 1998. Plant uptake of radionuclides in lysimeter experiments. *Environmental Pollution* 99.

Golmakani, S., Vahabi-Moghaddam, M., Hosseini, T., 2008. FACTORS AFFECTING THE TRANSFER OF RADIONUCLIDES FROM THE ENVIRONMENT TO PLANTS. *Radiation Protection Dosimetry* 130, 369-375.

Google, 2011. Google Earth. <http://www.google.de/intl/de/earth/index.html>.

Gore, A., 1983. Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

Göttlich, K., 1990. Moor- und Torfkunde, 3 ed. E Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Haapanen, R., Aro, L., Helin, J., Hjerpe, T., Ikonen, A., Kirkkala, T., Koivunen, S., Lahdenperä, A., Puhakka, L., Rinne, M., Salo, T., 2009. Olkiluoto Biosphere Description 2009. Posiva.

Hallet, B., 2011. Assessment of Maximum Future Glacial Erosion – Bruce County, Georgian Bay Region, Southern Ontario NWMO DGR-TR-2011-18 R000. Nuclear Waste Management Organization, Toronto, Canada.

Hjerpe, T., Ikonen, A., Broed, R., 2009. Biosphere Assessment Report. POSIVA.

IAEA, 2003. "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSessment (BIOMASS) Programme.

IAEA, 2009. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments TECDOC-1616.

IAEA, 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments, Technical Reports Series No. 472, Vienna.

ICRP, 1990. ICRP 60 Annals of the ICRP Published on behalf of the International Commission on Radiological Protection.

ICRP, 2007. ICRP 103 Annals of the ICRP The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.

Ikonen, A., Aro, L., Leppänen, V., 2008. Forecasts of future terrain and vegetation types at Olkiluoto and implications for spatial and temporal aspects of biosphere modelling. *Applied Radiation and Isotopes* 66, 1754-1758.

IPCC, 2007. IPCC Fourth Assessment Report (AR4) Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kashparov, V., Colle, C., Levchuk, S., Yoschenko, V., Zvarich, S., 2007. Radiochlorine concentration ratios for agricultural plants in various soil conditions. *Journal of Environmental Radioactivity* 95.

Kelkar, S., Ding, M., Chu, S., Robinson, B., Arnold, B., Meijer, A., Eddebarh, A., 2010. Modeling solute transport through saturated zone ground water at 10 km scale: Example from the Yucca Mountain license application. *Journal of Contaminant Hydrology* 117, 7-25.

Koch-Steindl, H., Pröhl, G., 2001. Considerations on the behaviour of long-lived radionuclides in the soil. *Radiat Environ Biophys* 40, 93-104.

Konopleva, I., Klemt, E., Konoplev, A., Zibold, G., 2009. Migration and bioavailability of ¹³⁷Cs in forest soil of southern Germany. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 315-321.

Kruyts, N., Delvaux, B., 2002. Soil organic horizons as a major source for radiocesium biorecycling in forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity* 58, 175-190.

KTBL, 2009. Faustzahlen für die Landwirtschaft, 14 ed. KTBL, Darmstadt.

Kundzewicz, Z., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Sen, Z., Shiklomanov, I., 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrol. Sci. J.* 53, 3-10.

Laing, G.D., Rinklebe, J., Vandecasteele, B., Meers, E., Tack, F., 2009. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. *Science Of The Total Environment* 407, 3972-3985.

Lauria, D., Ribeiro, F., Conti, C., Loureiro, F., 2009. Radium and uranium levels in vegetables grown using different farming management systems. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 176-183.

Lindborg, T., 2010. Landscape Forsmark – data, methodology and results for SR-Site, SKB TR-10-05.

Little, R., Avis, J., Fernandes, S., Garisto, N., Jackson, R., Rees, J., Towler, G., Walke, R., 2011a. Postclosure Safety Assessment: Features, Events and Processes NWMO DGR-TR-2011-29. Quintessa Ltd., SENES Consultants Ltd. and Geofirma Engineering Ltd.

Little, R., Avis, J., Garisto, N., Humphreys, P., King, F., Metcalfe, R., Penfold, J., Ramlakan, A., Suckling, P., Towler, G., Walke, R., Walsh, R., West, A., Wilson, J., 2011b. Postclosure Safety Assessment NWMO DGR-TR-2011-25. Quintessa Ltd., Geofirma Engineering Ltd. and SENES Consultants Ltd.

Löfgren, A., 2010. The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp, SKB TR-10-01.

Müller, H., Pröhl, G., 1993. ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Physics* 64, 232-252.

Müller, M., 1996. Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde, 5 ed. Gerold Richter.

Norden, S., 2010. Element-specific and constant parameters used for dose calculations in SR-Site, SKB TR-10-07.

Olyslaegers, G., Zeevaert, T., Pinedo, P., Simon, I., Proehl, G., Kowe, R., Chen, Q., Mobbs, S., Bergstroem, U., Hallberg, B., Katona, T., Eged, K., Kanyar, B., 2005. A comparative radiological assessment of five European biosphere systems in the context of potential contamination of well water from the hypothetical disposal of radioactive waste. *J Radiol Prot* 25, 375-391.

OPG, 2011. OPG's Deep Geological Repository For Low & Intermediate Level Waste: Environmental Impact Statement Summary, in: Ltd., G.A. (Ed.).

Paasikallio, A., Rantavaara, A., Sippola, J., 1994. The transfer of cesium-137 and strontium-90 from soil to food crops after the Chernobyl accident. *The Science of the Total Environment* 155, 109-124.

Patera, E., Hobart, D., Meijer, A., Rundberg, R., 1990. CHEMICAL AND PHYSICAL PROCESSES OF RADIONUCLIDE MIGRATION AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 142, 331-347.

Peel, M., Finlayson, B., McMahon, T., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633-1644.

Petit, J., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N., Barnola, J., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davisk, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V., Legrand, M., Lipenkov, V., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzmank, E., Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.

Pinedo, P., Thorne, M., Egan, M., Calvez, M., Kautsky, U., 2005. Consideration of environmental change in performance assessments. *Journal of Environmental Radioactivity* 84, 185-209.

Posiva, 2010. Interim Summary Report of the Safety Case 2009. Posiva Oy, Oikiluoto.

Pröhl, G., 2009. Interception of dry and wet deposited radionuclides by vegetation. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 675-682.

Pröhl, G., Chen, Q., Pinedo, P., Olyslaegers, G., Simon, I., Bergstrom, U., Hallberg, B., Kanyar, B., Kowe, R., Mobbs, S., Zeevaert, T., 2004a. Biosphere models for safety assessment of radioactive waste disposal based on the application of the reference biosphere methodology BioMoSA Final Report GSF-Bericht 06/04. GSF-Forschungszentrum.

Pröhl, G., Müller, H., 1996. Radiation exposure from radionuclides in ground water: an uncertainty analysis for selected exposure scenarios. *Radiat Environ Biophys* 35, 205-218.

Pröhl, G., Olyslaegers, G., Zeevaert, T., Kanyer, B., Pinedo, P., Simon, I., Bergström, U., Hallberg, B., Mobbs, S., Chen, Q., Kowe, R., 2004b. Biosphere models for safety assessment of radioactive waste disposal, GSF-Bericht

Rosen, K., 1996. Transfer of radiocaesium in sensitive agricultural environments after the Chernobyl fallout in Sweden. II. Marginal and seminatural areas in the county of Jämtland. *The Science of the Total Environment* 182, 135-145.

Rosen, K., Eriksson, A., Haak, A., 1996. Transfer of radiocaesium in sensitive agricultural environments after the Chernobyl fallout in Sweden. I. County of Ggvilleborg. *The Science of the Total Environment* 182, 117-133.

Rosen, K., Vinichuk, M., Johanson, K., 2009. ¹³⁷Cs in a raised bog in central Sweden. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 434-539.

Rosén, K., Vinichuk, M., Nikolova, I., Johanson, K., 2011. Long-term effects of single potassium fertilization on ¹³⁷Cs levels in plants and fungi in a boreal forest ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity*, 178-184.

Rudrappa, T., Biedrzycki, M., Bais, H., 2008. Causes and consequences of plant-associated biofilms. *FEMS Microbiol Ecol* 64, 153-166.

Salbu, B., Lind, O., Skipperud, L., 2004. Radionuclide speciation and its relevance in environmental impact assessments. *Journal of Environmental Radioactivity* 74, 233-242.

Schneider, K., Kuznetsov, V., Sanzharova, N., Kanter, U., Telikh, K., Khlopuk, M., 2008. Soil-to-plant and soil-to-grain transfer of ¹³⁷Cs in field-grown maize hybrids during two contrasting seasons: assessing the phenotypic variability and its genetic component. *Radiat Environ Biophys* 47, 241-252.

Shinonaga, T., Schimmack, W., Gerzabek, M., 2005. Vertical migration of ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs and ²²⁶Ra in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation. *Journal of Environmental Radioactivity* 79, 93-106.

Siebert, S., Döll, P., Feick, S., Hoogeveen, J., Frenken, K., 2007. The digital global map of irrigation areas. FAO.

Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J., Frenken, K., Feick, S., 2005. Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 535-547.

SKB, 2010a. Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site – synthesis and summary of results, TR-10-09

SKB, 2010b. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-49.

SKB, 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark: Main report of the SR-Site project, TR-11-01, Technical Report. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Smith, G., Kozak, M., 2011. HISTORICAL DEVELOPMENT AND EVOLUTION OF EPRI'S POST-CLOSURE DOSE ASSESSMENT OF POTENTIAL RELEASES TO THE BIOSPHERE FROM THE PROPOSED HLW REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN. *Health Physics* 101, 709-721.

Smith, G., Watkins, B., Little, R., Jones, H., Mortimer, A., 1996. Biosphere Modeling and Dose Assessment for Yucca Mountain. TR-107190 3294-18.

Statistisches-Bundesamt, 2004. Statistik der Wasserversorgung in der Landwirtschaft 2002. Statistisches Bundesamt.

Statistisches-Bundesamt, 2010. Statistisches Jahrbuch 2010. Statistisches Bundesamt.

Staven, L., Rhoads, K., Napier, B., Streng, D., 2003. A compendium of transfer factors for agricultural and animal products. PNNL.

StrlSchV, 2008. Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793) geändert worden ist".

Succow, M., Joosten, H., 2001. Landschaftsökologische Moorkunde, 2 ed. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Takeda, A., Tsukada, H., Y Takaku, Akata, N., Hisamatsu, S., 2008. Plant induced changes in concentrations of caesium, strontium and uranium in soil solution with reference to major ions and dissolved organic matter. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 900-911.

Teuteberg, H., 1981. Wie ernährten sich Arbeiter im Kaiserreich?, Arbeiterexistenz im 19. Jahrhundert. Münstersches Informations- und Archivsystem multimedialer Inhalte (MIAMI), Münster, pp. 57-73.

Till, J., Grogan, H., 2008. Radiological Risk Assessment and Environmental Analysis. Oxford University Press.

Torudd, J., 2010. Long term radiological effects on plants and animals of a deep geological repository SR-Site Biosphere. SKB TR-10-08.

Velasco, H., Juri-Ayub, J., Sansone, U., 2009. Influence of crop types and soil properties on radionuclide soil-to-plant transfer factors in tropical and subtropical environments. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 733-738.

Vinichuk, M., Taylor, A., Rosén, K., Johanson, K., 2010. Accumulation of potassium, rubidium and caesium (¹³³Cs and ¹³⁷Cs) in various fractions of soil and fungi in a Swedish forest. *Science of the Total Environment* 408, 2543-2548.

Walke, R., Limer, L., Little, R., Towler, G., 2009. Postclosure Safety Assessment (V1): Analysis of the Normal Evolution Scenario. NWMO DGR-TR-2009-02.

Walke, R., Little, R., Ramlakan, A., Towler, G., 2011. Postclosure Safety Assessment: Analysis of the Normal Evolution Scenario NWMO DGR-TR-2011-26. Quintessa Ltd.

Walker, W., 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. FAO, Rome.

Watkins, B., Smith, G., Little, R., Kessler, J., 1999. A Biosphere Modeling Methodology for Dose Assesments Of The Potential Yucca Mountain Deep Geological High Level Radioactive Waste Repository. *Health Physics* 76, 355-367.

Watt, M., Silk, W., Passioura, J., 2006. Rates of Root and Organism Growth, Soil Conditions, and Temporal and Spatial Development of the Rhizosphere. *Annals of Botany* 97, 839-855.

Wheater, H., Bell, J., Butler, A., Jackson, B., Ciciani, L., Ashworth, D., Shaw, G., 2007. Biosphere Implications of Deep Disposal of Nuclear Waste: The Upward Migration of Radionuclides in vegetated Soil. Imperial College Press, London.

Zhu, Y., Shaw, G., Nisbet, A., Wilkins, B., 2000. Effect of potassium (K) supply on the uptake of ¹³⁷Cs by spring wheat (*Triticum aestivum* cv. Tonic): a lysimeter study. *Radiat Environ Biophys* 39, 283-290.

Zibold, G., Klemm, E., Konopleva, I., Konoplev, A., 2009. Influence of fertilizing on the ¹³⁷Cs soil-plant transfer in a spruce forest of Southern Germany. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 489-496.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz