Untersuchungen zur internen Strahlenexposition durch Cäsium-137 in der nördlichen Ukraine

Diplomarbeit

Dem Fachbereich Physik der Universität Hannover vorgelegt von

Jan-Henryk Wicke geboren am 10. Juli 1979 in Hannover

Bearbeitet am Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie in der Zeit von Oktober 2003 bis Oktober 2004

Referent: Prof. Dr. Michel Korreferent: PD Dr. Leya

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung				
	1.1	Aufgal	benstellung	1	
	1.2	Übersi	icht der Proben	2	
	1.3	Gliede	rung der Arbeit	2	
2	Gru	ndlagen	1	5	
	2.1	Natürl	liche Radionuklide der Zerfallsreihen, Kalium und Cäsium	5	
		2.1.1	Natürliche Radionuklide und Zerfallsreihen	5	
		2.1.2	Radioaktive Gleichgewichte	7	
		2.1.3	Kalium	9	
		2.1.4	Cäsium	9	
		2.1.5	$\gamma\text{-}Strahlung$ der Radionuklide natürlicher Zerfallsreihen und von Ka-		
			lium und Cäsium	10	
	2.2	Der Tr	ransfer von Radionukliden in der Umwelt	12	
	2.3	Dosisb	egriffe	14	
		2.3.1	Physikalische Dosisgrößen	14	
		2.3.2	Dosisgrößen im Strahlenschutz	14	
	2.4	Der U	nfall von Tschernobyl	16	
		2.4.1	Der Kernreaktor von Tschernobyl	16	
		2.4.2	Der Ablauf des Reaktorunglücks	20	
		2.4.3	Freisetzung und Verbreitung radioaktiver Stoffe	22	
		2.4.4	Deposition von Radionukliden und Expositionspfade	24	
		2.4.5	Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung	26	
		2.4.6	Strahlenexpostition und radiologische Folgen des Unfalls	26	
		2.4.7	Die heutige Situation	27	
	2.5	Nachw	zeis von γ -Strahlung mit Halbleiterdetektoren	29	
		2.5.1	We chselwirkung von γ -Strahlung mit Materie	29	
		2.5.2	Detektorsysteme	35	
3	Exp	eriment	telles	39	
	3.1	Prober	naufbereitung	39	
		3.1.1	Allgemeines	39	
		3.1.2	Milch	39	
		3.1.3	Käse	40	
		3.1.4	Beeren	40	
		3.1.5	Tierische Fleisch-, Organ- und Knochenproben	40	
		3.1.6	Bodenproben	41	
		3.1.7	Sonstige Proben	42	

	3.2	Nulleffekt und Kalibrierungen	42
		3.2.1 Nulleffekt	42
		3.2.2 Energie- und Halbwertbreitenkalibrierung	43
		3.2.3 Efficiency-Kalibrierung	44
		3.2.4 Summationskorrektionen	50
	3.3	Auswertung von Einzelmessungen	51
		3.3.1 Spezifische Aktivität	51
		3.3.2 Messunsicherheit der spezifischen Aktivität	51
		3.3.3 Erkennungs-, Nachweis- und Vertrauensgrenzen	53
	3.4	Statistische Auswerteverfahren	57
		3.4.1 Normalverteilung und logarithmische Normalverteilung	57
		3.4.2 Statistische Tests	58
	3.5	Qualitätssicherung	61
		3.5.1 Sorgfalt in der Probenaufbereitung	61
		3.5.2 Nulleffekt	61
		3.5.3 Ringvergleich V/98	62
		3.5.4 Kaliumchlorid als Referenzmaterial	65
		3.5.5 Güte aliquoter Teile	65
		3.5.6 Einfluss der Korngröße bei Bodenproben	66
		3.5.7 Laborinterne Vergleiche	67
		3.5.8 Vergleiche zu ukrainischen Messungen	69
4	Spe	zifische Aktivitäten untersuchter Radionuklide in Nahrung und Böden	73
	11	Cägium 127 und Kolium 40	70
	7.1	$\operatorname{Casium-137}$ und $\operatorname{Canum-40}$	-73
	4.1	4.1.1 Vorbemerkungen	73 73
	7.1	4.1.1 Vorbemerkungen	73 73 74
	4.1	4.1.1Vorbemerkungen	73 73 74 92
	4.2	4.1.1 Vorbemerkungen	73 73 74 92 95
	4.2	4.1.1 Vorbemerkungen	73 73 74 92 95 95
	4.2	4.1.1Vorbemerkungen4.1.2Organische Proben4.1.3BodenprobenBodenproben4.2.1Organische Proben4.2.2Bodenproben	73 73 74 92 95 95 95
	4.1 4.2 4.3	4.1.1Vorbemerkungen4.1.2Organische Proben4.1.3BodenprobenNatürliche Radionuklide4.2.1Organische Proben4.2.2BodenprobenZusammenfassung	73 73 74 92 95 95 95 96 98
5	4.2 4.3 Trai	4.1.1 Vorbemerkungen	 73 73 74 92 95 95 96 98 99
5	 4.1 4.2 4.3 Tran 5.1 	4.1.1 Vorbemerkungen	73 73 74 92 95 95 95 96 98 99 99
5	4.14.24.3Tran 5.1	4.1.1 Vorbemerkungen	73 73 74 92 95 95 95 96 98 99 99 99
5	4.24.3Tran5.1	4.1.1 Vorbemerkungen	 73 73 74 92 95 95 96 98 99 99 99 99 99
5	4.24.3Tran5.1	4.1.1 Vorbemerkungen	 73 73 74 92 95 96 98 99 99 99 99 103
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen	 73 73 74 92 95 95 96 98 99 99 99 99 99 99 103 104
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen	 73 73 74 92 95 95 96 98 99 99 99 99 99 103 104 104
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben 4.1.3 Natürliche Radionuklide 4.2.1 Organische Proben 4.2.2 Bodenproben 4.2.2 Silla Kalium-40 Monte-Carlo-Simulationen 4.2.2 5.1.3 Schweinefleisch Direkte Vergleiche <t< td=""><td> 73 73 74 92 95 96 98 99 99 99 99 99 99 103 104 105 </td></t<>	 73 73 74 92 95 96 98 99 99 99 99 99 99 103 104 105
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben Natürliche Radionuklide	 73 73 74 92 95 96 98 99 99 99 99 99 99 99 99 90 103 104 105 108
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben Natürliche Radionuklide	 73 73 74 92 95 95 96 98 99 99 99 99 99 99 99 103 104 105 108 110
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben Natürliche Radionuklide	 73 73 74 92 95 96 98 99 99 99 99 99 99 103 104 105 108 110 112
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben Natürliche Radionuklide	 73 73 74 92 95 96 98 99 90 103 104 105 108 110 112 114
5	 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben Natürliche Radionuklide	 73 73 74 92 95 95 96 98 99 99 99 99 99 99 99 99 99 103 104 105 108 110 112 114 114
5	 4.1 4.2 4.3 Tran 5.1 5.2 	4.1.1 Vorbemerkungen 4.1.2 Organische Proben 4.1.3 Bodenproben Natürliche Radionuklide	 73 73 74 92 95 96 98 99 104 105 108 110 112 114 114 118

6	Mod	lellierung der internen Strahlenexposition durch Cäsium-137	123			
	6.1	Vorbemerkungen	123			
	6.2	Parameter der Modellierung	125			
		6.2.1 Verzehrsgewohnheiten	125			
		6.2.2 Retentionsfaktoren der Zubereitung	131			
		6.2.3 Cäsium-137-Gehalte in Lebensmitteln	132			
	6.3	Modellierungen	133			
		6.3.1 Direkte Modellierung	133			
		6.3.2 Modellierung mit Daten aus den Jahren 1998/99 \ldots	136			
		6.3.3 Modellierung mit Transferfaktoren	137			
	6.4	Diskussion der Ergebnisse	140			
7	Zusa	ammenfassung und Ausblick	143			
Α	Eing	esetzte Geräte und Software	145			
В	Tabo	ellen und Abbildungen	147			
	B.1	Tabellen	147			
	B.2	Abbildungen	186			
С	Abk	ürzungen und Formelzeichen	199			
Lit	Literaturverzeichnis 20					
Da	Danksagung 2					
с:	Cincenst in dialoite culdimon a					
Eigenstandigkeitserklarung 209						

Inhalts verzeichnis

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie (ZSR) unterhält seit einigen Jahren Forschungskontakte zur *State University of Agriculture and Ecology of Ukraine* (SUAEU) in Zhitomir¹. Das ZSR war somit in der Lage, bereits mehrere Untersuchungen zur Strahlenexposition der Bevölkerung um den Unglücksreaktor von Tschernobyl durchzuführen.

Für diese Arbeit lagen mehr als 600 Proben aus dem ukrainischen Dorf Christinowka und seiner Umgebung vor. Christinowka hat um die 40 Einwohner (Stand: 1999 [Han03]) und liegt in der Zone II um den Unglücksreaktor von Tschernobyl (siehe Abschnitt 2.4.5), etwa 75 km in südwestlicher Richtung von diesem entfernt (siehe Abb. B.1, Seite 186). In der unmittelbaren Nähe des Ortes gibt es einen kleinen Fluss, die Usch. Die Lebensumstände in Christinowka sind ländlich-bäuerlich und die Umgebung besteht aus landwirtschaftlichen Nutzflächen, Flüssen, Seen, Wäldern und Wiesen. Die Versorgung mit Lebensmitteln erfolgt zu etwa 90 % durch die Eigenerzeugung und das Sammeln in nahen Wäldern [Han03]. Erst seit dem Jahre 1999 existiert im Nachbardorf Nosdristsche ein kleines Geschäft, welches Erzeugnisse anbietet, die außerhalb der Zone II produziert wurden [Bot00].

Die Proben, entnommen bzw. gesammelt in der Zeit von März 2002 bis September 2003, wurden mit Hilfe der Gammaspektrometrie auf die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}$ hin untersucht. Einige Proben wurden auch auf Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen hin ausgewertet. Anhand dieser Messergebnisse sollte folgendes untersucht werden:

- Prüfung der spezifischen Aktivitäten von Zerfallsreihennukliden auf erhöhte Werte insbesondere für Bodenproben.
- $\bullet\,$ Transfer von $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}$ zwischen den beprobten Kompartimenten.
- Modellierung der Ingestionsdosis durch ¹³⁷Cs für die Einwohner von Christinowka anhand von Monte-Carlo-Simulationen.

¹Anschrift: Stari Bulvar 7 Zhitomir, 262 001 Ukraine

1.2 Übersicht der Proben

Die Proben wurden im Auftrag des ZSR von Mitarbeitern der SUAEU entnommen und stammen aus dem Anbau und der Viehzucht der Einwohner Christinowkas sowie der umliegenden Natur.

Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Proben bietet Tabelle B.1 (ab Seite 147).

Um eine spätere Modellierung der Ingestionsdosis für die Bewohner der Gegend zu ermöglichen, mussten Probenmaterialien ausgewählt werden, die eine repräsentative Berücksichtigung der Verzehrsgewohnheiten der Bewohner Christinowkas ermöglichen.

Leider existieren über die genaue Probennahme und die Probenbehandlung durch die Mitarbeiter der SUAEU nur noch spärliche Informationen. Auf die vorhandenen Informationen zur Probenbehandlung wird in den Abschnitten 3.1 und 3.5.8 eingegangen. Folgendes ist zur Probennahme bekannt [Rom04a]:

- Die Milch für eine Probe stammt stets nur von einer Kuh, d. h. es wurde keine Milch verschiedener Kühe zu einer Probe vermischt.
- Getreideproben wurden nach der Ernte aus Säcken entnommen. Jede Probe bezieht sich dabei auf ein Feld. Bei den zugehörigen Bodenproben handelt es sich um Mischproben von dem betreffenden Feld.
- Bei den Bodenproben handelt es sich vermutlich nur um Material aus dem Wurzelbereich, d. h. um die obersten 20 Zentimeter. Für eine Probe wurden zunächst fünf bis sechs "Punktproben" mit einer Schaufel entnommen, die dann auf einer Kunststofffolie gemischt wurden. Für jede Probe wurde insgesamt etwa 1 kg Material entnommen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist in fünf noch folgende Kapitel und eine Zusammenfassung aufgegliedert:

- In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen für die im Rahmen dieser Arbeit angewandten Verfahren und Konzepte vorgestellt. Dies beinhaltet eine Übersicht über die untersuchten Radionuklide, deren Gammastrahlung und Konzepte zur Beschreibung des Radionuklidtransfers zwischen den hier betrachteten Kompartimenten. Zudem sollen Dosisbegriffe in Bezug auf ionisierende Strahlung, die genaueren Zusammenhänge des Unfalls von Tschernobyl sowie wichtige physikalische und technische Aspekte der Gammaspektrometrie mit Halbleiterdetektoren, der hier verwendeten Messtechnik, erläutert werden.
- Kapitel 3 behandelt den experimentellen Teil dieser Arbeit. Es beginnt mit einer Beschreibung der Probenaufbereitung. Anschließend werden die praktischen Aspekte der Gammaspektrometrie erläutert, d.h. notwendige Kalibrierungen und das Verfahren der Auswertung einer Einzelmessung, inklusive der Berechnung der charakteristischen Grenzen. Die im späteren Verlauf der Arbeit eingesetzten statistischen

Methoden, die sich auf aus Einzelmessungen gewonnene Datensätze beziehen, werden schließlich ebenso thematisiert wie eine ausführliche Beschreibung der für diese Arbeit durchgeführten Qualitätssicherungsmaßnahmen.

- In Kapitel 4 werden die ermittelten spezifischen Aktivitäten an ¹³⁷Cs und ⁴⁰K für die verschiedenen Probenmaterialien aufgelistet, wenn möglich auf ihre Verteilungen untersucht und insbesondere für ⁴⁰K mit einigen Literaturwerten verglichen.² Ebenso erfolgt eine Diskussion der Messungen natürlicher Radionuklide.
- Kapitel 5 thematisiert die ermittelten Transferfaktoren für die untersuchten Umweltkompartimente. Es beinhaltet einen Vergleich mit Literaturwerten sowie Untersuchungen zum Vorliegen von logarithmischen Normalverteilungen.
- In Kapitel 6 wird, basierend auf den in den Kapiteln 4 und 5 diskutierten Ergebnissen und mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen, eine Modellierung der Ingestionsdosis für die Bevölkerung des Herkunftsortes der Proben vorgenommen.

 $^{^{2}}$ Ausführlichere Auflistungen von Literaturwerten für die spezifische Aktivität von $^{40}{\rm K}$ in den meisten hier untersuchten Probenmaterialien finden sich in [Vah04b].

1 Einleitung

2.1 Natürliche Radionuklide der Zerfallsreihen, Kalium und Cäsium

2.1.1 Natürliche Radionuklide und Zerfallsreihen

Übersicht

Die ungefähr 80 natürlich vorkommenden Radionuklide lassen sich unterteilen in 45 den Zerfallsreihen der langlebigen Mutternuklide ²³²Th, ²³⁵U und ²³⁸U zugehörige, etwa 15 kosmogene mit verhältnismäßig kurzen Halbwertzeiten, sowie einige isolierte primordiale Radionuklide, deren erster Kernzerfall zu stabilen Kernen führt [Sie96].

Bei den primordialen Radionukliden, zu denen auch die Mutternuklide der genannten Zerfallsreihen gehören, handelt es sich um solche, die in der Nukleosynthese vor der Entstehung der Erde gebildet wurden. Die Mutternuklide der erwähnten Zerfallsreihen besitzen dabei auch im geologischen Maßstab verhältnismäßig große Halbwertzeiten, so dass sie auch heute noch relevant sind. Anders verhält es sich mit dem Radionuklid ²⁴¹Pu und den Mitgliedern seiner Zerfallsreihe, deren Halbwertzeiten zu klein sind, als dass sie heute noch als natürlich vorkommende Radionuklide von Bedeutung wären.

Ein Beispiel für ein isoliertes primordiales Radionuklid ist 40 K, auf das unten noch genauer eingegangen werden soll.

Kosmogene Radionuklide werden ständig durch Wechselwirkungen der primären kosmischen Strahlung mit Gasatomen der Erdatmosphäre erzeugt, und können dabei direkt als Spallationsprodukte entstehen (Bsp.: Tritium ³H) oder indirekt durch Kernreaktionen mit Neutronen der Sekundärstrahlung gebildet werden (Bsp.: Kohlenstoff ¹⁴C).

Die Zerfallsreihen

Als Uran-Actinium-Zerfallsreihe wird die bei 235 U startende Zerfallsreihe bezeichnet. Für die Massenzahlen A der beteiligten Nuklide gilt A = 4n + 3 mit $n \in \mathbb{N}$.

Die ²³⁸U-Zerfallsreihe ist auch unter dem Namen Uran-Radium-Zerfallsreihe bekannt. Hier gilt für alle beteiligten Nuklide A = 4n+2. In dieser Zerfallsreihe finden sich unter anderem Nuklide wie ²³⁴Th (Halbwertzeit $T_{1/2}$: 24,1 d), ^{234m}Pa (1,2 min), ²²⁶Ra (1600 a), ²¹⁴Bi (19,9 min) und ²¹⁴Pb (26,8 min).

Für die Nuklide der von ²³²Th ausgehenden Thorium-Zerfallsreihe gilt A = 4n. ²²⁸Ac (6,15 h), ²¹²Pb (10,6 h) und ²⁰⁸Tl (3,05 min) sind Beispiele für Radionuklide aus dieser Zerfallsreihe.

Uran, Radium und Thorium sind drei bedeutsame Radionuklide der Zerfallsreihen. Bis auf das Uran, welches nur in den beiden Zerfallsreihen vorkommt, für die es auch das Ausgangsnuklid stellt, kommen diese Radionuklide in allen drei Zerfallsreihen vor.

Uran

Die natürliche Isotopenzusammensetzung des Urans beinhaltet zu 99,28 % 238 U $(T_{1/2}: 4,5 \cdot 10^9 \,\mathrm{a}).$ 235 U $(7 \cdot 10^8 \,\mathrm{a})$ bzw. 234 U $(2,5 \cdot 10^9 \,\mathrm{a})$ sind nur zu 0,72 % bzw. 0,0056 % enthalten [Sch02]. 238 U und 235 U sind die Ausgangsglieder ihrer Zerfallsreihen, 234 U ist ein Zwischenprodukt der 238 U-Reihe. Das dem Isotopenverhältnis entsprechende Aktivitätsverhältnis $A(^{238}\mathrm{U})/A(^{235}\mathrm{U})\approx 21,7$ kann, von natürlichen, fossilen Kernreaktoren wie Oklo abgesehen, als in der Natur konstant angesehen werden.

Uran kann in vier Oxidationsstufen (+III bis +VI) auftreten, in der Natur dominieren aber die Wertigkeiten +IV und +VI [Sch02]. Aufgrund seines großen Ionenradius von 0,105 nm für U(IV) bzw. 0,08 nm für U(VI) ist Uran ein geochemisch inkompatibles Element und somit in den wichtigsten gesteinsbildenden Mineralien nur in Spuren zu finden [Kem96].

Radium

Radium ist ein Erdalkalimetall mit einem Ionenradius von $0,152\,\mathrm{nm}$. Seine chemischen Eigenschaften ähneln denen das Bariums.

Von den 25 bekannten, sämtlich radioaktiven Radium-Isotopen treten vier in den natürlichen Zerfallsreihen auf. Dies sind ²²⁴Ra (Thorium-Reihe, $T_{1/2}$: 3,66 d), ²²⁸Ra (Thorium-Reihe, 5,7 a), ²²³Ra (Uran-Actinium-Reihe, 11,44 d) und das bereits erwähnte ²²⁶Ra. Lediglich die Halbwertzeit des ²²⁶Ra ist dabei groß genug, um von geologischer Bedeutung zu sein. Zusammen mit ²²⁸Ra ist ²²⁶Ra auch von besonderer radiologischer Bedeutung. Für ²²⁸Ra ist dieses insbesondere durch seinen vergleichsweise hohen Ingestionsdosiskoeffizienten begründet [Eur96]. Jener ist für ²²⁶Ra zwar niedriger, allerdings handelt es sich bei dem direkten Tochternuklid von ²²⁶Ra um ²²²Rn ($T_{1/2}$: 3,8 d), ein Isotop des Edelgases Radon, welches über Inhalation für einen beträchtlichen Anteil der natürlichen Strahlenexposition sorgt.

Thorium

In jeder der drei beschriebenen Zerfallsreihen kommen zwei Thorium-Isotope vor. In der Thorium-Reihe ist dies neben dem Ausgangsnuklid ²³²Th ($T_{1/2}$: 1,4 · 10¹⁰ a) das ²²⁸Th (1,91 a). In der Uran-Actinium-Reihe entstehen ²³¹Th (25,8 h) und ²²⁷Th (18,7 d). In der Uran-Radium-Reihe schließlich wird neben dem bereits erwähnten ²³⁴Th auch ²³⁰Th (7,5 · 10⁴ a) gebildet.

Der Ionenradius von Thorium in der einzigen geochemisch bedeutsamen Oxidationsstufe +IV beträgt 0,11 nm. Daher liegt Thorium, wie auch das Uran mit seinem ähnlichen Ionenradius, in der Regel in den Hauptmineralien nur als Spurenelement, d. h. in Gehalten von wenigen ppm, vor. Desweiteren ist Thorium in Gewässern nur schwer löslich und von geringer Mobilität.

2.1.2 Radioaktive Gleichgewichte

Für den Fall, dass in einer Zerfallsreihe

Nuklid $1 \rightarrow$ Nuklid $2 \rightarrow \ldots \rightarrow$ Nuklid $n; n \ge 2$

die Aktivität der Radionuklide aller n Generationen in guter Näherung gleich ist, d. h.

$$A_1 = A_2 = \ldots = A_n, \tag{2.1}$$

so spricht man von einem radioaktiven Gleichgewicht. Ausgehend vom radioaktiven Zerfallsgesetz,

$$A(t) = \lambda N(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t=0)e^{-\lambda t}; \quad \lambda = \ln 2/T_{1/2},$$
(2.2)

lassen sich verschiedene Fälle unterscheiden, für die sich ein solcher Gleichgewichtszustand mit der Zeit aufbaut. Dazu ist es zweckmäßig, zunächst eine Zerfallsreihe mit n = 2 zu betrachten. In diesem Fall gilt mit $N_{i0} := N_i(t = 0)$:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$= \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2$$

$$\iff \frac{d}{dt} \left(N_2 e^{\lambda_2 t} \right) = \lambda_1 N_{10} e^{-(\lambda_1 - \lambda_2) t}.$$
(2.3)

Integration liefert schließlich

$$N_{2}(t) = -\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{1} - \lambda_{2}} N_{10} e^{-\lambda_{1} t} + \left(N_{20} + \frac{\lambda_{1}}{\lambda_{1} - \lambda_{2}} N_{10} \right) e^{-\lambda_{2} t}$$

$$= \frac{\lambda_{1}}{\lambda_{1} - \lambda_{2}} N_{10} \left(e^{-\lambda_{2} t} - e^{-\lambda_{1} t} \right) + N_{20} e^{-\lambda_{2} t}, \qquad (2.4)$$

wobei der zweite Summand der ersten Gleichung als ersten Faktor die Integrationskonstante enthält.

Im folgenden soll von $N_{20} = 0$ ausgegangen werden, d. h. von einer vollständigen Trennung von Mutter- und Tochtersubstanz.

Ist nun $T_{1/2,1} \gg T_{1/2,2}$, d.h. $\lambda_1 \ll \lambda_2$, so erhält man aus (2.4):

$$N_{2}(t) \approx -\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{2}} \underbrace{N_{10} \cdot e^{-\lambda_{1}t}}_{=N_{1}(t)} \left(e^{(\lambda_{1} - \lambda_{2})t} - 1 \right)$$
$$\approx \frac{\lambda_{1}}{\lambda_{2}} N_{1}(t), \qquad (2.5)$$

7

wobei für die zweite Abschätzung $t \gg T_{1/2,2}$ angenommen wurde, d. h. erst nach genügend langer Zeit stellt sich der Zustand (2.5) ein. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass für alle genügend großen t

$$A_1 = \lambda_1 N_1(t) \approx \lambda_2 N_2(t) = A_2$$

gilt, sich also ein radioaktives Gleichgewicht eingestellt hat. Man spricht in diesem Fall vom säkularen Gleichgewicht. Dieses Resultat lässt sich auf den Fall einer Zerfallsreihe mit n Nukliden übertragen, indem man die Differentialgleichung (2.3) durch ein System von n gekoppelten Differentialgleichungen ersetzt:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\vdots$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n.$$

Ist nun $2 \le i \le n$ sowie $T_{1/2,1} \gg T_{1/2,i}$ und $N_{i0} = 0$ für alle i, so folgt $A_1 = A_i \quad \forall i$.

Für den Fall $T_{1/2,1} > T_{1/2,2}$ errechnet man ganz analog zu (2.5): $(\lambda_2 - \lambda_1) N_2(t) \approx \lambda_1 N_1(t)$. Hier liegt also kein Gleichgewicht im Sinne von (2.1) vor, sondern wegen

$$\frac{A_1(t)}{A_2(t)} \approx \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} < 1$$

lediglich im Sinne von

$$\frac{d}{dt}\frac{A_1(t)}{A_2(t)} = 0.$$

Die Aktivität des Tochternuklids ist im Falle dieses **transienten Gleichgewichts** größer als die Mutternuklids.

Für $T_{1/2,1} < T_{1/2,2}$ kann sich wegen $d/dt(A_1/A_2) \neq 0$ kein Gleichgewichtszustand aufbauen.

Von entscheidender Bedeutung ist an dieser Stelle das säkulare Gleichgewicht aufgrund seiner Auswirkungen auf die Bestimmung der Aktivität von Nukliden einer Zerfallsreihe. So existiert in diesem Fall die Möglichkeit, die Aktivität eines Mutternuklids einer solchen Reihe über eines oder mehrere seiner Tochternuklide zu bestimmen, mit denen es im Gleichgewicht steht. Dies ist z. B. bei der gammaspektrometrischen Auswertung des ²²⁶Ra notwendig, dessen Photopeak bei 186,1 keV von einem ²³⁵U-Peak bei 185,7 keV gestört wird. Bei den Energieauflösungen der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Detektoren ist die Auswertung dieses Peaks ohne Korrektur nicht fehlerfrei möglich. Da aber dem ²²⁶Ra in der Uran-Radium-Reihe einige Nuklide mit wesentlich kürzeren Halbwertzeiten folgen [Pfe98], steht es mit diesen im säkularen Gleichgewicht, vorausgesetzt die direkte Tochter ²²²Rn kann nicht aus der Probe entweichen, weshalb der zur Messung verwendete Probenbehälter gasdicht zu verschließen ist. Die Aktivitätsbestimmung für ²²⁶Ra kann dann beispielsweise über die dritte oder vierte Tochter, ²¹⁴Pb oder ²¹⁴Bi, erfolgen. Da die Halbwertzeiten dieser Nuklide und auch die der zweiten Tochter ²¹⁸Po in der Größenordnung von Minuten liegen, ist die Halbwertzeit des ²²²Rn mit 3,8 d entscheidend für die Bestimmung der Zeit, die bis zum Aufbau eines solchen säkularen Gleichgewichts notwendig ist. Man geht in der Praxis davon aus, dass mindestens sechs bis sieben Halbwertzeiten abzuwarten sind, in diesem Fall also etwa drei Wochen.

Auch für die Aktivitätsbestimmung des ¹³⁷Cs spielt das säkulare Gleichgewicht zumindest theoretisch eine Rolle, wie weiter unten noch erläutert werden soll.

2.1.3 Kalium

Das natürliche Isotopengemisch des Kaliums setzt sich zu 93,2% aus 39 K, zu 6,73% aus 41 K und zu 0,0117% aus 40 K zusammen [Kem96]. Nur bei dem zuletzt genannten handelt es sich um ein instabiles Isotop. Es gehört zu den isolierten primordialen Radionukliden, d. h. aufgrund seiner Halbwertzeit von $1,28 \cdot 10^9$ a sind bereits etwa 90\% des ursprünglich vorhandenen 40 K zerfallen. Kalium ist in der Natur weit verbreitet und das Isotopenverhältnis ist weitestgehend konstant. Die Gehalte in Gesteinen reichen von 0,004% in Ultrabasiten bis zu mehr als 5% in manchen Graniten und Tonsteinen [Kem96]. Für Böden wird in [Kem96] eine mittlere Kaliumkonzentration von 1,68% angegeben, mit einem Schwankungsbereich von 0,05-9,5%. Dies entspricht einer mittleren spezifischen Aktivität an 40 K von 523 Bq kg⁻¹, sowie einem Schwankungsbereich von 16-2960 Bq kg⁻¹.

Kalium nimmt intensiv am biologischen Kreislauf teil und zählt auch für den Menschen zu den essentiellen Spurenelementen. Der Einbau von Kalium aus dem Boden in Pflanzen und Pilze ist ebenso beträchtlich. Zu beachten ist dabei, dass für Kalium häufig eine homöostatische Kontrolle zu beobachten ist. Unter Homöostase versteht man eine Regulation, die das innere Milieu eines Organismus trotz eventueller Umweltschwankungen innerhalb bestimmter Grenzen konstant hält [CR03]. Dieser Effekt kann sichtbar werden, wenn man den Transfer von ⁴⁰K von Böden in die zugehörige Vegetation untersucht. So folgt aus einem höheren ⁴⁰K-Gehalt im Boden nicht notwendigerweise ein höherer Gehalt in der Vegetation [Sim02] (siehe Abschnitte 2.2 und 5.2). Auch für Berechnungen der Ingestionsdosis durch ⁴⁰K muss die Homöostase berücksichtigt werden.

2.1.4 Cäsium

Bei Cäsium handelt es sich ebenfalls um ein Alkalimetall, welches in seinem chemischen Verhalten dem Kalium ähnelt.

Das in der Natur vorkommende, stabile ¹³³Cs tritt in Böden und Gesteinen auf. Die wichtigsten künstlichen Radionuklide des Cäsiums sind ¹³⁴Cs ($T_{1/2}$: 2,06 a) und aufgrund seiner längeren Halbwertzeit insbesondere ¹³⁷Cs (30,0 a). Neben dem Unglück von Tschernobyl waren die oberirdischen Kernwaffenexplosionen der Jahre 1945/87 eine wesentliche Freisetzungsquelle für ¹³⁷Cs. Insgesamt wurden hierbei 10¹⁸ Bq freigesetzt [Mic01].

Cäsium kann im Boden fixiert werden, indem gelöste oder austauschbar gebundene Cäsium-Ionen in die Zwischenschichten aufgeweiteter Dreischichttonminerale einwandern [Sch02]. Die Cäsium-Ionen stehen dabei mit Kalium- und Ammonium-Ionen in Konkurrenz um diese Bindungsplätze, und ein erhöhter Kalium-Gehalt führt dementsprechend zu einer geringeren Cäsium-Fixierung. Einmal derart gebundenes Cäsium kann jedoch kaum durch Natrium- und Calcium-Ionen ausgetauscht werden. Die Fixierung des Cäsiums im Boden steigt also zu höheren Tongehalten sowie zu einem fallenden Angebot an gelöstem und austauschbarem Kalium hin an. Auch höhere pH-Werte oder Humusschichtdicken [Hei92] bewirken eine höhere Cäsium-Fixierung im Boden, die eine geringere Pflanzenverfügbarkeit

zur Folge hat. So beobachtet man die niedrigsten Transferraten vom Boden in Pflanzen auf tonigen Böden [Wir96]. Leicht bzw. deutlich höhere Transferfaktoren (siehe Abschnitt 2.2) sind auf lehmigen bzw. sandigen Böden zu erwarten. Zu beachten ist allerdings auch hierbei der Kalium-Gehalt im Boden. So steht Cäsium auch bei der Wurzelaufnahme in Konkurrenz zu Kalium, so dass ein erhöhter Kalium-Gehalt im Boden die Aufnahme des Cäsiums in die Pflanze negativ beeinflussen kann. Cäsium verteilt sich in Organismen ähnlich wie Kalium, beim Menschen ist im wesentlichen der ganze Körper betroffen.¹

2.1.5 γ -Strahlung der Radionuklide natürlicher Zerfallsreihen und von Kalium und Cäsium

Alle in diesem Abschnitt angegebenen Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten p_{γ} sind [SS98] entnommen.

Kalium

Abb. 2.1 zeigt das Zerfallsschema von ⁴⁰K. In dieser Arbeit wurden die bei der Umwandlung von ⁴⁰Ar^{*} zu ⁴⁰Ar ausgesendeten Gammaquanten mit einer Energie von etwa 1,46 MeV zur Bestimmung der ⁴⁰K-Aktivität betrachtet. Es ist $p_{\gamma} = 0,1067$.



Abbildung 2.1: Zerfallsschema von ⁴⁰K nach [Sie96]. Die Zahlen in Klammern geben entweder die Gammaenergie, die maximale Betaenergie oder die Zerfallsenergie bei Elektroneneinfang sowie die relativen Häufigkeiten der jeweiligen Übergange an.

Cäsium

Abb. 2.2 zeigt das Zerfallsschema von 137 Cs. Das angeregte, metastabile Bariumniveau hat eine Halbwertzeit von 2,55 min, ist also deutlich kurzlebiger als 137 Cs. Daher kann von einem säkularen Gleichgewicht zwischen 137 Cs und 137 Ba ausgegangen werden und der

¹Manche anderen Elemente zeigen eine ausgeprägte Selektion. Hierzu zählen auch die radiologisch relevanten Iod und Strontium. Iod reichert sich bevorzugt in der Schilddrüse an, Strontium in den Knochen.

Photopeak des ¹³⁷Ba für die Aktivitätsbestimmung des ¹³⁷Cs per Gammaspektrometrie benutzt werden. Im folgenden wird dieser Photopeak aus Gründen der Einfachheit und Konvention stets als ¹³⁷Cs-Peak identifiziert.

Der Wert der Gammaenergie beträgt 661,7 keV [SS98] und es ist $p_{\gamma} = 0.85$.



Abbildung 2.2: Zerfallsschema von ¹³⁷Cs nach [Kri02]. Die Zahlen in Klammern geben entweder die Gammaenergie oder die maximale Betaenergie, sowie die relativen Häufigkeiten der jeweiligen Übergange an.

Natürliche Radionuklide

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit ausgewerteten Linien natürlicher Radionuklide. In der Spalte "Nuklid für Nachweis" sind gegebenenfalls für den Nachweis des in der ersten Spalte aufgelisteten Nuklids verwendete Nuklide genannt. Hierfür wurde ein radioaktives Gleichgewicht zwischen dem Nuklid der ersten Spalte und dem oder den jeweiligen Nukliden der zweiten Spalte angenommen. Bei den mit (\star) gekennzeichneten Nukliden musste dafür sichergestellt werden, dass Radon in der Probenmatrix verbleibt. Für eine Erläuterung der mit $,k_s$ " beschrifteten Spalte, siehe Abschnitt 3.2.4.

Anhand der sich überlagernden Peaks von ²³⁵U und ²²⁶Ra bei etwa 186 keV soll erläutert werden, wie in diesem Fall eine Bestimmung der Aktivität $A_{\rm U-235}$ von ²³⁵U möglich ist. Zunächst erhält man die Aktivität $A_{\rm Ra-226}$ des ²²⁶Ra aus den Tochternukliden ²¹⁴Pb und ²¹⁴Bi (siehe Abschnitt 2.1.2). Ist nun $A_{\rm U-235}^{\rm unkorr}$ die Aktivität, die man erhielte, wenn man den Peak für ²³⁵U ohne Abzug des ²²⁶Ra-Beitrags auswerten würde, so gilt:

$$A_{\rm U-235} = A_{\rm U-235}^{\rm unkorr.} - A_{\rm Ra-226} \cdot \frac{p_{\gamma,\rm Ra-226}}{p_{\gamma,\rm U-235}}$$

wobei $p_{\gamma,U-235}$ und $p_{\gamma,Ra-226}$ die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Emissionswahrscheinlichkeiten für ²³⁵U bzw. ²²⁶Ra bei 186 keV sind.

Nuklid	Nuklid für Nachweis	Gammaenergie [keV]	p_{γ}	k_s
$^{238}\mathrm{U}$	234 Th	63,28	0,041	1
	$^{234\mathrm{m}}\mathrm{Pa}$	766,37	0,00316	1
		$1001,\!03$	0,00839	1
226 Ra	226 Ra	186,10	0,0351	1
	214 Pb (*)	295,22	$0,\!1815$	1
		$351,\!93$	$0,\!351$	1
	$^{214}{ m Bi}~(\star)$	609,31	$0,\!446$	$1,\!14$
		1120,29	$0,\!147$	$1,\!16$
$^{235}\mathrm{U}$	$^{235}\mathrm{U}$	143,76	0,1096	1,03
		163,33	$0,\!0508$	$1,\!03$
		185,72	$0,\!572$	1
		$205,\!31$	$0,\!0501$	$0,\!99$
228 Ra	$^{228}\mathrm{Ac}$	338,32	0,1127	1,02
		911,20	0,258	$1,\!03$
		968,97	$0,\!158$	$1,\!03$
228 Th	212 Pb (*)	238,63	0,433	1
	208 Tl (\star)	$583,\!19$	$0,\!845$	$1,\!18$

Tabelle 2.1: Gammalinien natürlicher Radionuklide, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden.

2.2 Der Transfer von Radionukliden in der Umwelt

Zur Erfassung des komplexen Verhaltens von Radionukliden in der Umwelt werden in der Regel so genannte Kompartmentmodelle verwendet. Man beschreibt den Transfer der Radionuklide zwischen den einzelnen Kompartimenten, d. h. Teilen des untersuchten Systems, mit Transferfaktoren \mathcal{T}_{AB} , die die Konzentrationsverhältnisse der Radionuklide zwischen Kompartimenten A und B darstellen. Ein Transferfaktor bezieht sich dabei stets auf ein bestimmtes Radionuklid:

$$\mathcal{T}_{AB} := \frac{\text{Aktivitätskonzentration des Nuklids in Kompartiment } A}{\text{Aktivitätskonzentration des Nuklids in Kompartiment } B}.$$

Bei einem Transferfaktor kann es sich um einen so genannten *aggregierten* Transferfaktor handeln, der den Transfer über mehrere Kompartimente zusammenfasst, z. B. der Transfer von Tierfutter (Kompartiment B) in die Milch² (Kompartiment A), oder aber um einen Transferfaktor, der zwei Kompartimente direkt miteinander verknüpft, wie der wichtige Boden-Pflanze-Transferfaktor:

$$\mathcal{T}_{Pf,Bo} := \frac{Aktivitätskonzentration \ des \ Nuklids \ in \ der \ Pflanze}{Aktivitätskonzentration \ des \ Nuklids \ im \ Wurzelbereich \ des \ Bodens}.$$

²Betrachtet man den Transfer in Milch oder Fleisch, muss neben den Aktivitätskonzentrationen der Kompartimente auch die Menge des von den Tieren verzehrten Futters berücksichtigt werden.

Der Bezug der Aktivitätskonzentrationen wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich gewählt. Es ist für eine bessere Vergleichbarkeit der Transferfaktoren sinnvoll, beim Boden-Pflanze-Transferfaktor stets die Trockenmasse für beide Aktivitätskonzentrationen als Bezug zu verwenden, da die Frischmasse deutlichen Schwankungen unterliegen kann. Nur für den Fall, dass eines der Kompartimente eine Flüssigkeit ist, z. B. Milch, wird die Aktivitätskonzentration üblicherweise auf die Frischmasse bezogen.

Wird hingegen angestrebt, Werte für Transferfaktoren in die Modellierung einer Strahlenexposition einzubeziehen, so kann für zum Verzehr geeignete Pflanzen auch die Verwendung der Frischmasse als Aktivitätskonzentrationsbezug notwendig sein, da sich Angaben zu Verzehrsgewohnheiten in der Regel auf jene beziehen. Problematisch an der Verwendung der Trockenmasse als Bezug ist zudem, dass kein echter Konsens zur genauen Vorgehensweise bei der Trocknung von Böden und Pflanzen existiert.

Die oben gegebene Definition des Transferfaktors bezieht sich auf zusammengehörige Probenpaare, also beispielsweise eine bestimmte Pflanze und eine aus ihrem Wurzelbereich entnommene Bodenprobe oder auch jeweilige Mischproben von einer bestimmten Wiese oder einem Feld. Beispielsweise in [EK02] wird jedoch darauf hingewiesen, dass ein allgemeiner Zusammenhang zwischen den Konzentrationen in Boden und einer Pflanzenart für ein bestimmtes Radionuklid nicht existiert. Das bedeutet, dass die häufig angenommene Beziehung

$$C_P = \mathcal{T}C_B,\tag{2.6}$$

wobei C_P bzw. C_B die Aktivitätskonzentrationen, d. h. spezifischen Aktivitäten des Radionuklids in der Pflanzenart bzw. in Boden sind und \mathcal{T} einen konstanten Transferfaktor für diese Konstellation darstellt, oft experimentell nicht reproduziert werden kann. Vielmehr ist festzustellen, dass auch der Transferfaktor von den Aktivitätskonzentrationen in Boden und Pflanze abhängen kann und von (2.6) nur für begrenzte Bereiche der Aktivitätskonzentration im Boden und bestimmte Elemente ausgegangen werden kann [SE88]. Eine Rolle spielt dabei für Radionuklide, die zu den essentiellen Spurenelementen gehören, wie z. B. Kalium, der Effekt der Homöostase (siehe Abschnitt 2.1.3). In diesem Fall kann häufig in recht guter Näherung C_P = konst. beobachtet werden. Dies resultiert in einem mit steigendem C_B sinkendem Transferfaktor. Experimentell beobachtet wurde dies beispielsweise in [Sim02]. Für ⁴⁰K ergab sich dort entsprechend (2.6) für einige Pflanzen der Marshall-Inseln: $\mathcal{T} = \mathcal{T}(C_B) \propto C_B^{-1}$. Auch für Cäsium wurde ebenda kein konstanter Transferfaktor ermittelt, sondern $\mathcal{T} \propto C_B^{-a}$, mit 0,19 $\leq a \leq 0,48$.

Transferfaktoren unterliegen einer großen Variabilität, die sich auf bis zu drei Größenordnungen für bestimmte Boden-Pflanzen-Kombinationen belaufen kann [EK02]. Dies macht Vergleiche und insbesondere die Angabe eines universellen Boden-Pflanze-Transferfaktors für eine bestimmte Pflanzenart sehr schwierig und deutet auf die enorme Anzahl an Parametern hin, die einen Transferfaktor beeinflussen können. Schließlich wird mit diesem makroskopischen Parameter versucht, die Wirkung einer Vielzahl von jeweils variablen chemischen, biologischen, physikalischen und hydrologischen Prozessen in Böden, sowie physiologischen Prozessen in Pflanzen integriert zu beschreiben.³ Erschwert wird dies durch weitere

³Ein Transferfaktor sollte daher idealerweise mit möglichst vielen Informationen über den jeweiligen Boden angegeben werden. So werden beispielsweise in [TRS94] die Transferfaktoren für verschiedene Pflanzenarten in Bezug auf verschiedene Bodentypen unterschieden (siehe Abschnitt 5.2.1).

zum Teil unwägbare Einflussgrößen wie klimatische Bedingungen oder anthropogene Einwirkungen, wie z. B. die Landwirtschaft. Daher sind auch Laborversuche zu Transferfaktoren mit auf Freilandmessungen beruhenden Ergebnissen nur mit starken Einschränkungen vergleichbar [Vah04b].

Bei Anwendungen des Transferfaktors für radioökologische Modellierungen beschränkt man sich trotz alledem häufig auf das einfache Modell gemäß (2.6). Dies entspricht dem Bestreben, insbesondere Modelle für konservative Abschätzungen nicht zu komplex werden zu lassen.

Es wird oft versucht, die große Variabilität der Transferfaktoren mit logarithmischen Normalverteilungen zu beschreiben (siehe Abschnitt 3.4.1). Dieser Aspekt soll im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 5 thematisiert werden.

2.3 Dosisbegriffe

2.3.1 Physikalische Dosisgrößen

Da die Strahlenwirkungen auf den Menschen letztlich auf der Absorption von Strahlungsenergie im Gewebe beruhen, kann als fundamentale physikalische Dosisgröße die Energiedosis D angesehen werden. Sie ist die pro Massenelement eines bestimmten Absorbermaterials absorbierte Energie. Für die Energiedosis wird die Einheit Gray (Gy) verwendet:

$$1 \operatorname{Gy} = 1 \operatorname{J} \operatorname{kg}^{-1}.$$

Weitere physikalische Dosisgrößen sind die Ionendosis und das Kerma. Unter der Ionendosis versteht man die durch Bestrahlung eines Luftvolumens durch ionisierende Strahlung erzeugte elektrische Ladung dividiert durch die Masse des Luftvolumens. Der Begriff ,Kerma' steht für ,kinetic energy released per unit mass' [Kri02] und bezeichnet den Quotienten aus der durch indirekt ionisierende Strahlung in einem bestrahlten Materievolumen auf geladene Sekundärteilchen übertragenen Bewegungsenergie und der Masse des bestrahlten Volumenelements.

2.3.2 Dosisgrößen im Strahlenschutz

Für den Strahlenschutz werden spezielle, auf der Energiedosis beruhende Dosisgrößen verwendet, die jedoch keine physikalischen Dosisgrößen sind und für die zur Unterscheidung als Einheit das Sievert (Sv) verwendet wird:

$$1 \, \mathrm{Sv} = 1 \, \mathrm{J} \, \mathrm{kg}^{-1}$$

Die Strahlenschutzverordnung [Str01] unterscheidet zwischen Messgrößen und Schutzgrößen. Erstgenannte sind operative Dosisgrößen, die als Orts- und Personendosis der Messung zugänglich sind. Schutzgrößen, die sich unter dem Oberbegriff ,Körperdosis' in ,Organdosen' und ,Effektive Dosis' aufteilen lassen, sind hingegen nicht direkt messbar.

Die Organdosis H_T bezieht sich auf einen bestrahlten Körperteil T. Sie berechnet sich aus der mittleren Energiedosis D_T für T über

$$H_T = w_R \cdot D_T,$$

wobei w_R ein Strahlungs-Wichtungsfaktor für die vorliegende Strahlungsqualität R ist, womit der unterschiedlichen relativen biologischen Wirksamkeit der verschiedenen Strahlungsarten Rechnung getragen wird. w_R kann [Str01] entnommen werden (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Strahlungs-Wichtungsfaktoren	w_R	in	Abhängigkeit	von	der	Strahlungsart
[Str01].						

Strahlungsart, Energiebereich		
Photonen, alle Energien		
Elektronen und Myonen, alle Energien		
Neutronen, $< 10 \mathrm{keV}$		
$10100\mathrm{keV}$		
$> 100 { m keV} { m bis} 2 { m MeV}$		
$> 2{ m MeV}$ bis 20 MeV		
$>20{ m MeV}$		
Protonen (außer Rückstoßprotonen), $> 2{ m MeV}$		
$\alpha\text{-}\mathrm{Teilchen},$ Spaltfragmente, schwere Kerne		

Sind mehrere Strahlungsqualitäten R an der Bestrahlung des betrachteten Körperteils beteiligt, so gilt:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}.$$

Die Effektive Dosis E ist ein Maß für das mit einer Strahlenexposition verbundene stochastische Risiko, bezieht sich auf den ganzen Körper oder Bereiche des Körpers und wird daher aus den verschiedenen Organdosen berechnet:

$$E = \sum_{T} w_T \cdot H_T, \tag{2.7}$$

wobei es sich bei den w_T um Gewebe-Wichtungsfaktoren handelt (Tabelle 2.3).

Die sogenannte Organ-Folgedosis $H_T(\tau)$ für einen Zeitraum τ ab einem Zeitpunkt t_0 ist das Zeitintegral über die mittlere Organ-Dosisleistung $\dot{H}_T(t)$ im Organ oder Gewebe Tzum Zeitpunkt t:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} dt \, \dot{H}_T(t).$$
(2.8)

Für zum Zeitpunkt t_0 Erwachsene ist der Wert $\tau = 50$ a üblich, für Kinder $\tau = 70$ a [Str01]. Die Effektive Folgedosis $E(\tau)$ berechnet sich über (2.7) indem man dort H_T durch $H_T(\tau)$ aus (2.8) ersetzt.

Gewebe oder Organ	w_T
Keimdrüsen	0,20
rotes Knochenmark	$0,\!12$
Dickdarm	$0,\!12$
Lunge	$0,\!12$
Magen	$0,\!12$
Blase	$0,\!05$
Brust	$0,\!05$
Leber	$0,\!05$
Speiseröhre	$0,\!05$
Schilddrüse	$0,\!05$
Haut	$0,\!01$
Knochenoberfläche	$0,\!01$
Andere Organe oder Gewebe	$0,\!05$

Tabelle 2.3: Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T [Str01]. Der Punkt ,Andere Organe oder Gewebe' beinhaltet Nebennieren, Gehirn, Dünndarm, Niere, Muskel, Bauchspeicheldrüse, Milz, Thymusdrüse und Gebärmutter.

2.4 Der Unfall von Tschernobyl

Der Reaktorunfall vom 26. April 1986, der sich in unmittelbarer Nähe der Stadt Pripyat und einige Kilometer entfernt von der Stadt Tschernobyl, etwa 20 km südlich der weissrussischen Grenze und 100 km nördlich von Kiew, ereignete, war das größte Unglück in der friedlichen Nutzung der Kernenergie, welches sich bisher zugetragen hat. Die international beachteten radiologischen Folgen wurden insbesondere in nicht-wissenschaftlichen Medien zum Teil verzerrt dargestellt [Gon96]. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die tatsächlichen und vermeintlichen radiologischen Auswirkungen des Unglücks von Tschernobyl weit reichende politische Konsequenzen nach sich zogen.

Für die Wissenschaft hingegen war und ist das Unglück eine große Chance, die Auswirkungen einer bedeutsamen nuklearen Katastrophe auf Mensch und Umwelt zu studieren. Die Möglichkeiten, neue Erkenntnisse zu gewinnen, sind dabei auch heute noch nicht erschöpft. So wird beispielsweise in [Sha01] auf den hohen Wert der näheren Umgebung von Tschernobyl als "einzigartiges Freiland-Laboratorium" hingewiesen. Für die Zukunft werden auch weiterhin internationale Zusammenarbeit und Langzeitstudien gefordert.

2.4.1 Der Kernreaktor von Tschernobyl

Das Kernkraftwerk Tschernobyl bestand 1986 aus vier Leistungsreaktoren in zwei Doppelblöcken. Bei allen vier Reaktoren handelte es sich um Reaktoren vom Typ ,RBMK-1000'. Dahinter verbirgt sich die russische Bezeichnung für ,Siedewasserreaktor hoher Leistung', , Reaktor Bol'schoj Moschtschnosti Kipjaschtschij'. Die vier Blöcke waren zum Zeitpunkt des Unfalls seit drei bis neun Jahren in Betrieb.

Bei einem Reaktor vom Typ RBMK-1000 handelt sich um einen leichtwassergekühlten, graphitmoderierten, heterogenen Druckröhrenreaktor mit einer elektrischen Leistung von $1000 \,\mathrm{MW}_{\mathrm{el}}$. Es existieren auch RBMK-Reaktoren mit anderen elektrischen Leistungen.

Der zylindrische Reaktorkern mit einer Höhe von 7 m und einem Durchmesser von 12 m besteht aus 1700 t Graphit, aufgeschichtet aus einzelnen Blöcken mit Seitenlängen von zweimal 25 cm und einmal 60 cm, und befindet sich in einer ebenfalls zylindrischen Metallhülle mit unterer und oberer Stahlabdeckung. Diese Hülle ist nicht als Druckbehälter ausgelegt. Die Schutzgase Stickstoff und Helium füllen den freien Raum des Behälters zur Verhinderung von Graphitbränden aus.

Zentrale Bohrungen in den Graphitblöcken sorgen für 1661 vertikale Kanäle für die Druckröhren, sowie für 211 weitere Kanäle für die das Schutz- und Steuersystem bildenden Absorberstäbe. Zwei separate Kühlsysteme ober- und unterhalb des Reaktorkerns sind mit den die Stahlabdeckungen durchdringenden Brennstoff- und Absorberkanälen verbunden.

In jeder Druckröhre hängen je zwei Brennelemente mit einer Länge von 3,65 m übereinander. Ein Brennelement enthält ca. 115 kg Uran – UO₂-Pellets mit einer Zirkon-Niob-Legierung dienen als Brennstoff – und besteht aus 18 Brennstäben. Ein Brennstab hat dieselbe Länge wie das Brennelement selbst. Insgesamt enthält der Reaktor 190 t UO₂ mit einem Anteil von 2 % ²³⁵U.⁴

Das Kühlmittel Wasser hat beim Kerneintritt eine Temperatur von 270 °C und verdampft teilweise aufgrund der durch die Kernspaltungen in den Brennelementen erzeugten Wärme. Das Wasser-Dampf-Gemisch tritt aus dem Reaktorkern aus und gelangt zu zwei Dampfabscheidern. Der separierte Dampf wird dann zu einer Turbine mit 500 MW_{el} geleitet, das Wasser und das Turbinenkondensat werden zurück in den Reaktor gepumpt. Das Kühlsystem des Reaktors besteht aus zwei Schleifen, d. h. insgesamt werden zwei Turbinen verwendet.

Abb. 2.3 zeigt den Reaktor in einer schematischen Darstellung. Man beachte, dass in dieser Abbildung nur eine der beiden Kühlsystemschleifen abgebildet ist.

Einen Überblick über die technischen Daten des Reaktors gibt Tabelle 2.4.

Für das Reaktorunglück waren einige besondere technische Eigenschaften des RBMK von Tschernobyl, die im Folgenden betrachtet werden sollen, von Bedeutung.

Ein wichtiger Aspekt ist der so genannte "Dampfblasenkoeffizient" der Reaktivität, der bei Reaktoren des RBMK-Typs positiv ist. Steigt nämlich die Leistung im Reaktorkern an, entstehen in den Druckröhren höhere Temperaturen und damit mehr Dampfblasen im Wasser, wodurch die Zahl der durch Wasser absorbierten Neutronen sinkt. Es sind dann mehr Neutronen vorhanden, die durch den Graphit moderiert werden können und somit

⁴Es ist ein Vorteil heterogener, graphitmoderierter Reaktoren, dass auch mit vergleichsweise wenig an ²³⁵U angereichertem Uran ein effektiver Neutronenvermehrungsfaktor $k_{\text{eff}} > 1$ der Kettenreaktion erreicht werden kann, wobei k_{eff} die Produktionsrate der Neutronen, dividiert durch die Summe aus Absorptionsund Auslaufrate ist [Mic95]. Dieser Unterschied zu leichtwassermoderierten Reaktoren ist in der im Vergleich zu ¹H geringen Neigung von ¹²C, thermische Neutronen zu absorbieren, begründet [Vol94].



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des RBMK-1000 von Tschernobyl [Vol94].

weitere Kernspaltungen auslösen können. Dadurch setzt sich der Temperaturanstieg fort, so dass noch mehr Dampfblasen erzeugt werden.⁵ Einschränkend ist allerdings zu erwähnen, dass dieser Effekt nur im niedrigen Leistungsbereich eine Rolle spielt [Bot00].

Desweiteren ist das im Tschernobyl-Reaktor verwendete System von Absorberstäben zu beachten. Um die Reaktorstabilität trotz des positiven Dampfblasenkoeffizienten und der nur recht langsamen Stabeinfahrgeschwindigkeit bei Schnellabschaltung von 0,4 m s⁻¹ (siehe Tabelle 2.4) zu erhalten, muss sich zu jedem Zeitpunkt eine Mindestanzahl von Absorberstäben im Reaktorkern befinden, um den für die jeweils aktuelle Betriebssituation existierenden Grenzwert der so genannten ,operativen Reaktivitätsreserve' ORM (,**O**perating **R**eactivity **M**argin') stets zu überschreiten [Krü96].⁶

Abb. 2.4 zeigt schematisch die Wirkung eines der Absorberstäbe, wie sie im RBMK-1000 von Tschernobyl eingesetzt wurden. Wie dort zu sehen ist, ist an den neutronenabsorbierenden Teil eines Absorberstabes ein Graphitverdränger gekoppelt. Ist der Absorberstab ausgefahren, so befindet sich nur der Graphitverdränger im Reaktorkern. Durch das Einfahren eines Absorberstabes wird jedoch im unteren Bereich des Reaktorkerns ein lokaler positiver Reaktivitätseintrag bewirkt, da der Graphit als Neutronenmoderator neutronen-

⁵Ein positiver Dampfblasenkoeffizient liegt also vor, wenn $\partial \varrho / \partial T > 0$ gilt, wobei $\varrho := 1 - 1/k_{\text{eff}}$ die Reaktivität ist [Mic95] und T die Temperatur des Kühlwassers bezeichnet.

⁶Nach [Bot00] ist der ORM-Wert das Reaktivitätsäquivalent aller in der jeweiligen Betriebssituation ganz oder teilweise in den Kern eingefahrenen Absorberstäbe und wird in Vielfachen des Reaktivitätsäquivalents eines mittleren, voll eingefahrenen Steuerstabes angegeben. Der ORM-Wert kann nicht direkt gemessen werden und muss bei gleicher Stabstellung nicht immer den gleichen Wert einnehmen [Mic95].

Thermische Leistung	$3200\mathrm{MW_{th}}$
Elektrische Leistung	$1000 \mathrm{MW_{el}}$
Wirkungsgrad	31%
Brennstoff	UO_2
Gesamtmasse Uran	ca. $190\mathrm{t}$
Anreicherung mit 235 U	2%
Moderator	Graphit
Gesamtmasse des Moderators	ca. 1700 t
Anzahl der Druckrohre für Brennelemente	1661
Gesamtlänge eines Druckrohres	$22\mathrm{m}$
Aussendurchmesser eines Druckrohres	$88\mathrm{mm}$
Anzahl der Brennelemente je Druckrohr	2
Anzahl der Brennstäbe je Brennelement	18
Brennelementlänge	ca. $3{,}65\mathrm{m}$
Anzahl der Führungsrohre mit Steuer- und Abschaltstäben	211
Stabeinfahrgeschwindigkeit bei Regelung	$0.2\mathrm{m~s^{-1}}$
Stabeinfahrgeschwindigkeit bei Schnellabschaltung	$0{,}4\mathrm{m~s^{-1}}$
Kühlmittel	H_2O
Kühlmitteltemperatur bei Kerneintritt	$270^{\circ}\mathrm{C}$
Kühlmitteltemperatur bei Kernaustritt	$284^{\circ}\mathrm{C}$
Kühlmitteldurchsatz	$37600{\rm t}~{\rm h}^{-1}$
Frischdampfdruck	$70\mathrm{bar}$
Frischdampfdurchsatz	$5780 t h^{-1}$

Tabelle 2.4: Technische Daten des RBMK-1000 von Tschernobyl [Vol94].

absorbierendes Wasser verdrängt. Wie im folgenden Abschnitt erläutert werden soll, trug dieser Umstand wesentlich dazu bei, dass es zu dem Unfall kommen konnte.

Mit dem Effekt der so genannten Xenon-Vergiftung soll allerdings zunächst noch ein weiterer Aspekt erwähnt werden, der im Rahmen des Unfalls größere Bedeutung erlangen sollte, wie z. B. in [Min01] und [Bot00] erwähnt wird.

Bei der Xenon-Vergiftung handelt es sich um eine Anreicherung des Isotops ¹³⁵Xe im Reaktorkern. ¹³⁵Xe kann mit einer Ausbeute von 0,02 bei der Kernspaltung von ²³⁵U direkt oder als Zerfallsprodukt von ¹³⁵I entstehen. ¹³⁵I wird mit einer Ausbeute von 0,064 als Spaltprodukt gebildet und kann zudem als Zerfallsprodukt des Spaltprodukts ¹³⁵Te entstehen und zerfällt mit einer Halbwertzeit von 6,6 h zu ¹³⁵Xe.

 135 Xe hat einen hohen Wirkungsquerschnitt für den Einfang thermischer Neutronen von $2,7\cdot 10^6$ b [Kra87] und reduziert so die Anzahl an thermischen Neutronen, die für weitere Kernspaltungen zur Verfügung stehen. Im normalen Leitstungsbetrieb eines Reaktors bleibt die Leistung des Reaktors jedoch konstant, da Bildung und Umwandlung durch Neu-



Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Absorberstäbe des RBMK-1000 von Tschernobyl [Krü96].

troneinfang des 135 Xe im Gleichgewicht stehen. Bei einer Absenkung der Leistung hingegen überwiegt die Bildung von 135 Xe zeitweilig gegenüber der Umwandlung durch Neutroneneinfang, so dass es zu einer Xenon-Vergiftung kommen kann.

2.4.2 Der Ablauf des Reaktorunglücks

Der Unfall ereignete sich während eines Tests, bei dem nachgewiesen werden sollte, dass bei einem totalen Spannungsausfall die Rotationsenergie des Turbinen-Generator-Satzes ausreichen würde, um die Speisewasserpumpen des Notkühlsystems für mindestens 35 Sekunden mit Strom zu versorgen, genau die Zeit, die bis zur Verfügbarkeit des Notstromsystems anzusetzen war [Min01].

Für das Experiment sollte die Reaktorleistung auf etwa 22-32% reduziert und einer der beiden Turbogeneratoren abgeschaltet werden. Der Generator sollte bei seinem Auslaufen nicht durch die Notkühlmittelpumpen, sondern durch vier Hauptkühlmittelpumpen belastet werden.

Der folgende zeitliche Ablauf des Unfalls beruht auf den Angaben in [Mic95] und [Min01]:

25.04.1986

- 01:06 Uhr Beginn der Leistungsreduzierung – 13:05 Uhr

Mit einer thermischen Leistung von $1600\,\rm MW_{th}$ werden $50\,\%$ der Nennleistung erreicht. Eine der beiden Turbinen wird abgeschaltet.

– 14:00 Uhr

Isolierung des Notkühlsystems, um eine Wassereinspeisung bei Ansprechen von Notkühlsignalen zu vermeiden.

Auf Anforderung des Lastverteilers in Kiew wird ein weiteres Absenken der Reaktorleistung zunächst nicht vorgenommen.

Eine Reaktivierung der Notkühlsysteme wird vom Betriebspersonal vergessen.

– 23:10 Uhr

Beginn des weiteren Abfahrens, um eine Leistung von 700–1000 $\rm MW_{th}$ zu erreichen.

26.04.1986

- 00:05 Uhr

Es wird eine Reaktorleistung von 720 MW_{th}, d. h. 22,6 % erreicht. Der für einen sicheren Betrieb zulässige untere Grenzwert liegt bei 700 MW_{th}, d. h. 22 %. Unter diesem Grenzwert wäre der Reaktor instabil und nur schwer kontrollierbar.

– 00:28 Uhr

Durch einen Fehler des Betriebspersonals fällt die Reaktorleistung unkontrolliert auf unter $30 \,\mathrm{MW_{th}}$, d. h. 1%. Der Leistungsabfall wird aufgrund der Verringerung des Dampfblasengehaltes im Kern und einer durch die Leistungsreduzierung seit Beginn der Versuchsvorbereitungen bewirkten Xenon-Vergiftung verstärkt.

– 00:32 Uhr

Der Versuch, durch das Ausfahren von Steuerstäben wieder eine positive Reaktivität zu erhalten, wird durch die Xenon-Vergiftung erschwert. Der ORM-Grenzwert wird deutlich unterschritten. Eine sichere Schnellabschaltung ist zu diesem Zeitpunkt bereits unmöglich.

– 00:43 Uhr

Überbrückung des Notabschaltsignals bei Nichtvorhandensein beider Turbinen.

– 01:00 Uhr

Die Reaktorleistung kann durch das Ausfahren der Absorberstäbe bei 200 $\rm MW_{th},$ d. h. 7 %, stabilisiert werden.

– 01:03 Uhr

Beiden Kühlkreisläufen werden die vier zugehörigen Pumpen zugeschaltet. Dies bewirkt einen höheren Kühlmitteldurchsatz und somit eine weitere Verringerung des Dampfblasengehaltes im Kern, was wiederum einen zusätzlichen negativen Reaktivitätseintrag im Kern zur Folge hat. Um dies auszugleichen, werden weitere Absorberstäbe ausgefahren, und der ORM-Wert sinkt noch weiter. Der Druck und der Wasserspiegel in den Dampfseparatoren schwanken heftig.

– 01:19 Uhr

Die Warnsignale "Wasserspiegel' und "Druck' in den Dampseparatoren werden vom Operator überbrückt. Diese Signale hätten zu einer Notabschaltung geführt.

– 01:23 Uhr

Der eigentliche Test beginnt trotz der dem Operator bekannten gefährlichen Situation, und die Turbinenventile werden wie geplant geschlossen. Die Verringerung des Kühlmitteldurchsatzes aufgrund der auslaufenden Pumpen und wärmer werdendes Wasser beim Kerneintritt bewirken wegen des positiven Dampfblasenkoeffizienten des Reaktors wenige Sekunden nach Testbeginn einen positiven Reaktivitätseintrag, der das Einfahren von Absorberstäben durch die automatische Regelung zur Folge hat. Allerdings verursacht dies aufgrund der Konstruktionsmängel der Absorberstäbe einen positiven Reaktivitätseintrag im unteren Teil des Reaktorkerns. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die Leistungsdichte im Reaktorkern stark inhomogen ist. Um 01:23:40 Uhr wird der Notschalter betätigt, nur Sekunden später wird der Reaktor prompt überkritisch⁷. Bei der Leistungsexkursion steigt die Reaktorleistung auf das ca. 440-fache des Auslegungswertes.

Es kam schliesslich zu einem starken Energieeintrag im Kernbrennstoff und durch einen Wärmeübertrag zwischen Brennstoff und Kühlmittel zu einer Dampfexplosion. Zudem begann der Graphit zu brennen. Der Reaktor wurde zerstört, auch der 1000 t schwere Reaktordeckel angehoben und Kernmaterial freigesetzt.

2.4.3 Freisetzung und Verbreitung radioaktiver Stoffe

Freisetzung

Die ,aktive' Unfallphase mit den radiologisch relevanten Freisetzungen dauerte zehn Tage. Zunächst sank die Aktivitätsfreisetzung pro Tag bis zum 1. Mai 1986. Ab dem 2. Mai kam es zu einem erneuten Anstieg der Freisetzungen, da sich der Reaktorkern mittlerweile durch von Hubschraubern abgeworfenen Materialien erneut erhitzt hatte. Dabei handelte es sich um Borkarbid, Dolomit, Blei und Ton-Sandgemisch [Krü96]. Diese Materialien wurden unter anderem mit der Absicht abgeworfen, eine erneute Kritikalität zu verhindern und Brände zu bekämpfen. Nach dem Erreichen eines weiteren lokalen Maximums der Aktivitätsfreisetzungsrate am 5. Mai kam es in der Folge zu einer abrupten Abnahme der Freisetzungen, da das Reaktorinventar sich nun in physikalisch und chemisch stabilere Formen umgewandelt hatte und die Brände aufhörten. Insgesamt wurden 5300 PBq freigesetzt [UNS00]. Tabelle 2.5 gibt einen Überblick über das zum Unfallzeitpunkt vorhandene Aktivitätsinventar in Block 4 des Kraftwerks sowie die Aktivitätsfreisetzungen in der Folgezeit, wobei nach der stark variierenden Flüchtigkeit der Elemente unterschieden wird.

⁷Ein Reaktor befindet sich in einem ,
prompt kritischen' bzw. ,
prompt überkritischen' Zustand, wenn für die Reaktivitä
t $\varrho = \beta$ bzw. $\varrho > \beta$ gilt, wobe
i β der Anteil der bei einer Kernspaltung zeitlich verzögert freigesetzten Neutronen ist [Mic
95]. Der weit überwiegende Teil der Neutronen wird prompt freigesetzt.

		Aktivitätsinventar	Freigesetzte	Freigesetzter
		vor dem Unfall	Aktivität	Anteil des
Radionuklid	Halbwertzeit	am 26.04.1986 [PBq]	[PBq]	Inventars
Edelgase				
⁸⁵ Kr	$10,7\mathrm{a}$	33	33	1
¹³³ Xe	$5,3\mathrm{d}$	6500	6500	1
Flüchtige Ele	mente			
¹³² Te	$3,2\mathrm{d}$	4200	~ 1150	0,27
131 I	$8,0\mathrm{d}$	3200	~ 1760	$0,\!55$
132 I	$2,3\mathrm{h}$	4200	1040	$0,\!25$
¹³³ I	$20,8\mathrm{h}$	4800	910	0,19
^{135}I	$6,6\mathrm{h}$	2900	250	0,09
^{134}Cs	$2,1\mathrm{a}$	150	~ 54	0,36
^{137}Cs	$30,0{\rm a}$	260	~ 85	0,33
Mittlere Elen	nente			
⁸⁹ Sr	$50,5\mathrm{d}$	3960	~ 115	0,03
$^{90}\mathrm{Sr}$	$28,5\mathrm{a}$	220	~ 10	0,05
$^{103}\mathrm{Ru}$	$39,3\mathrm{d}$	3770	> 168	0,04
106 Ru	$373,\!6\mathrm{d}$	860	> 73	0,08
¹⁴⁰ Ba	$12,\!8\mathrm{d}$	6070	240	0,04
Schwerflüchti	ge Elemente inl	kl. Brennstoffteilchen		
⁹⁵ Zr	$64,0\mathrm{d}$	5850	196	0,03
⁹⁹ Mo	$2{,}7\mathrm{d}$	5660	> 168	0,03
$^{141}\mathrm{Ce}$	$32,5\mathrm{d}$	6070	196	0,03
$^{144}\mathrm{Ce}$	$284,7\mathrm{d}$	5550	~ 116	$0,\!02$
²³⁹ Np	$2,4\mathrm{d}$	58100	945	0,02
²³⁸ Pu	$87,7{ m a}$	0,93	0,035	0,04
²³⁹ Pu	$24065\mathrm{a}$	0,96	$0,\!03$	$0,\!03$
²⁴⁰ Pu	$6537\mathrm{a}$	1,5	0,042	$0,\!03$
²⁴¹ Pu	$14,\!4{ m a}$	190	~ 6	$0,\!03$
²⁴² Cm	$162,\!8\mathrm{d}$	31	$\sim 0,9$	$0,\!03$
Insge	esamt freigesetz	te Aktivität:	5300	

Tabelle 2.5: Aktivitätsinventar von Block 4 und unfallbedingte Freisetzungen [UNS00].

Verbreitung

Durch den Brand wurden Teile des Reaktorinventars in große Höhen gebracht und mit den dort herrschenden Strömungen bewegt. Da die Freisetzung von Reaktorinventar über mehrere Tage andauerte, wurde die großräumige Verbreitung von verschiedenen meteorologischen Bedingungen beeinflusst. Zudem hatte die unterschiedliche chemische Form der Abgaben einen Einfluss auf die Verbreitung, so dass insgesamt von einer inhomogenen Deposition zu sprechen ist [Mic01].

Die großräumige Verbreitung erfolgte hauptsächlich in der unteren Troposphäre, der untersten Schicht der Atmosphäre [Krü96], in oberen Schichten der Atmosphäre konnten nur Spuren nachgewiesen werden. Betroffen war unmittelbar nach dem Unfall der gesamte Breitengürtel nördlich einer Breite von etwa 30° Nord.

In [UNS88] werden insgesamt drei Ausbreitungswolken angegeben: eine erste in nordnordwestlicher Richtung, die insbesondere Weißrussland, das Baltikum und Skandinavien erreichte, eine zweite in hauptsächlich westlicher Richtung mit Auswirkungen insbesondere auf Westeuropa samt den heutigen EU-Staaten östlich von Deutschland. Eine dritte Ausbreitungswolke in südwestlicher Richtung erreichte Rumänien, Bulgarien, den Balkan, Griechenland und die Türkei.

Durch den Unfall von Tschernobyl wurden die folgenden Kontaminationen (Depositionsdichten) mit $^{137}\rm{Cs}$ bewirkt [UNS00] [Mic01]:

- Weißrussland, Russische Föderation, Ukraine: > 37 kBq m $^{-2}$ auf 46 300 km², dabei > 1480 kBq m $^{-2}$ auf 3100 km²
- Übriges Europa: $> 37\,\rm kBq~m^{-2}$ auf $45\,260\,\rm km^2$
- Deutschland: $< 32 \text{ kBq m}^{-2}$.

2.4.4 Deposition von Radionukliden und Expositionspfade

Deposition von Radionukliden

In die Atmosphäre freigesetzte Radionuklide können sich durch eine Vielzahl von Prozessen auf Oberflächen, beispielsweise von Böden und Pflanzen, ablagern. Generell ist dabei zwischen trockener und nasser Deposition (z.B. ,Washout' durch Regen) zu unterscheiden. Bei der trockenen Deposition kommt den Waldgebieten eine besondere Bedeutung zu, da der dichte, relativ hohe Bewuchs Nuklide aus der Luft "filtert", was zu einem höheren Eintrag durch trockene Deposition als beispielsweise auf Ackerflächen führt. Örtliche Unterschiede in der nassen Deposition ergeben sich aus jeweils anderen meteorologischen Bedingungen.

Auch indirekte Effekte wie z. B. Laubfall können Radionuklide letztlich auf der Bodenoberfläche deponieren, von wo aus sie im Boden mit fortschreitender Zeit in Richtung zunehmender Tiefe migrieren, sofern sie nicht vorher durch Regen von der Bodenoberfläche auf Pflanzenoberflächen resuspendiert werden ("Splash-Effekt"). Dieser Prozess ist für unterschiedliche Radionuklide von den jeweiligen chemischen Eigenschaften abhängig. Der Tiefenmigration wirkt die Aufnahme von Radionukliden in Pilze oder Wurzeln von Pflanzen entgegen. Bodenverändernde Maßnahmen beispielsweise durch landwirtschaftliche Tätigkeiten wie Pflügen, wirken sich ebenfalls auf die Tiefenmigration aus.

Speziell Cäsium ist in der Humusauflage stark retardiert und wird stark von Baumwurzeln gebunden. In Wäldern ist daher für ¹³⁷Cs eine weniger effektive Tiefenmigration zu beobachten als außerhalb [Sch02] [Bot00].

Expositionspfade

In der Strahlenschutzverordnung [Str01] wird der Begriff *Expositionspfad* als "Weg der radioaktiven Stoffe von der Ableitung aus einer Anlage oder Einrichtung über einen Ausbreitungs- oder Transportvorgang bis zu einer Strahlenexposition des Menschen" definiert. Abb. 2.5 gibt eine Übersicht über mögliche Expositionspfade.



Abbildung 2.5: Schematische Darstellung möglicher Expositionspfade nach Ableitung radioaktiver Stoffe aus einer Quelle.

Eine Strahlenexposition aus der Luft können Menschen durch Direktstrahlung, Einatmen und Ablagerung der Radionuklide auf dem Körper erhalten. Die Direktingestion von kontaminiertem Boden spielt hauptsächlich für Kleinkinder eine Rolle. Der im Rahmen dieser Arbeit behandelte Expositionspfad ist die Aufnahme von Radionukliden mit der Nahrung, d. h. von Bewuchs (Pflanzen, Pilze), Tieren oder Tierprodukten. Zudem sollen Transferfaktoren für bestimmte Transfers zwischen den Kompartimenten Boden, Bewuchs, Tier und Tierprodukte bestimmt werden.

Im Falle des Reaktorunglücks von Tschernobyl spielte in den ersten Wochen nach dem Unglück auch der Expositionspfad Luft-Mensch neben der Aufnahme kontaminierter Nahrung eine wichtige Rolle [LP96]. ¹³¹I mit einer Halbwertzeit von 8,02 Tagen war hierbei das dosisbestimmte Nuklid und wurde insbesondere mit kontaminierter Kuhmilch ingestiert. Seit etwa einem Monat nach dem Unglück spielen im wesentlichen nur noch Expositionspfade über Böden eine Rolle. Dosisbestimmend sind mittlerweile hauptsächlich ¹³⁷Cs und ⁹⁰Sr mit Halbwertzeiten im Bereich von 30 Jahren, nachdem anfangs kurzlebigere Radionuklide wie u. a. ¹³⁴Cs ebenfalls relevant waren.

2.4.5 Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung

Im Jahre 1986 wurden in der Ukraine, in Weißrussland und der russischen Föderation insgesamt 116 317 Menschen aus 187 Ortschaften evakuiert [UNS00]. In der Ukraine waren im Zeitraum bis September 1986 91 406 Menschen aus 75 Siedlungen betroffen. 70 der Siedlungen wurden bis Ende Mai 1986 geräumt. In Weißrussland wurden von Mai bis September 1986 24 725 Menschen aus 108 Siedlungen evakuiert. 186 Menschen aus vier russischen Siedlungen mussten im August 1986 ihre Orte verlassen.

Zunächst wurde eine Zone mit einem Radius von 30 km um den Reaktor als Sperrzone definiert [DeC98]. 1991 wurde aufgrund gemessener ¹³⁷Cs-Depositionsdichten in einem ukrainischen Gesetz in vier Kontaminationszonen unterschieden [Bot00] [Law91]:

- Zone I: ¹³⁷Cs-Depositionsdichte: > 1480 kBq m⁻², Fläche: 2827 km² (76 Siedlungen), Sperrzone (bis 1998 sind seit der Evakuierung etwa 800 Menschen zurückgekehrt)
- Zone II: ¹³⁷Cs-Depositionsdichte: > 555 kBq m⁻², Fläche: 882 km² (92 Siedlungen), Erwartete Zusatzdosis aufgrund konservativer Abschätzungen: > 5 mSv a⁻¹, Sperrzone (etwa 11000 Menschen wurden nicht evakuiert, Anzahl an zurückkehrenden Menschen steigt)
- Zone III: ¹³⁷Cs-Depositions
dichte: > 195 kBq m⁻², Fläche: 3177 km² (835 Siedlungen), Erwartete Zusatz
dosis: 1–5 mSv a⁻¹
- Zone IV: ¹³⁷Cs-Depositions
dichte: > 37 kBq m⁻², Fläche: 1183 km² (1333 Siedlungen), Erwartete Zusatz
dosis: < 1 mSv a⁻¹, die 1,8 Mio. Einwohner dieser Zone werden radiologisch überwacht

2.4.6 Strahlenexpostition und radiologische Folgen des Unfalls

Die höchste Strahlenexposition wurde den etwa 600 Personen zuteil, die am 26. April 1986 u. a. mit Rettungsmaßnahmen beschäftigt waren. Sie erhielten Dosen bis 16 Gy [Mic01]. 134 Personen wurden mit akuter Strahlenkrankheit diagnostiziert, 28 davon starben innerhalb von vier Monaten nach dem Unfall. Zusätzlich gab es drei Unfalltote während der Löscharbeiten.

In [UNS00] werden 381 000 Arbeiter aufgelistet (siehe Tabelle 2.6), die in den Jahren 1986/89 mit Aufräumungs- und Sicherungsarbeiten in Weißrussland, der Russischen Föderation und der Ukraine beschäftigt waren (so genannte Liquidatoren). Es ist darauf hinzuweisen, dass die Dosisangaben für die Liquidatoren mit verhältnismäßig großen Unsicherheiten behaftet sind [Mic01].

Bisherige Untersuchungen zu stochastischen Strahlenschäden bei Liquidatoren lieferten keine statistisch signifikanten Hinweise auf erhöhte Erkrankungsraten [Min01]. Allerdings wurden psychische Störungen häufiger diagnostiziert als in der allgemeinen Bevölkerung [Mic01]. Dies kann jedoch nicht unmittelbar mit der Strahleneinwirkung in Zusammenhang gebracht werden.

In den Jahren 1986/95 erhielten 5,16 Mio. Menschen in Weißrussland, der Russischen Föderation und der Ukraine mittlere Dosen von $8,2\,\mathrm{mSv}$, sofern die Schilddrüsendosis nicht

Jahr	Anzahl der Arbeiter	Dosis bekannt $[\%]$	Mittlere Effektive Dosis [mSv]
1986	187 000	45	170
1987	107000	65	130
1988	45500	80	30
1989	42500	80	15
1986/89	381 000	52	113

Tabelle 2.6: Verteilung der Strahlenexposition der Liquidatoren für Weißrussland, die Russische Föderation und die Ukraine [UNS00] [Mic01].

berücksichtigt wird [Mic01]. Hierbei ist zum Vergleich von einer natürlichen Dosis von $24\,\mathrm{mSv}$ auszugehen.

Die Dosisabschätzungen für die evakuierten Menschen sind ebenfalls mit großen Unsicherheiten versehen. In [UNS00] wird hierzu angegeben, dass 30% der Evakuierten Effektive Dosen von unter $10 \,\mathrm{mSv}$, 86% weniger als $50 \,\mathrm{mSv}$ und etwa 4% mehr als $100 \,\mathrm{mSv}$ erhielten.

Am relevantesten in Bezug auf medizinische Folgen waren Expositionen der Schilddrüsen mit ¹³¹I insbesondere bei Kindern und Jugendlichen. So werden für Weißrussland, die Russische Föderation und die Ukraine 46 000 Kinder mit mittleren Schilddrüsendosen von 0,7 Gy (maximal 15 Gy) und 466 000 Menschen mit mittleren Schilddrüsendosen von 0,3 Gy genannt [Mic01]. Im Zeitraum 1986/98 wurden in diesen Ländern 1036 Fälle von Schilddrüsenkrebs bei Kindern verzeichnet, die 180 ohne Strahlenexposition zu erwartenden Fällen gegenüber zu stellen sind [Mew04].

Gemäß Angaben in [UNS88] ist für den Europäischen Fernbereich mit mittleren Effektiven 50-Jahre-Folgedosen von 1,9–4,7 mSv zu rechnen, wobei geometrische Standardabweichungen von etwa 2 anzunehmen sind [Mic01]. Lokale Unterschiede existieren aufgrund der meteorologischen Bedingungen zur Zeit der Aktivitätsfreisetzungen. Deutschland wird beispielsweise gemeinhin in drei Gebiete unterschiedlicher Depositionsdichten unterteilt. In der Reihenfolge absteigender Depositionsdichte sind dies das Voralpenland, sowie die Gegenden südlich und nördlich der Donau.

Es ist zu betonen, dass alle Werte für den europäischen Fernbereich im Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenbelastung liegen.

2.4.7 Die heutige Situation

Der heutige Zustand des Kernkraftwerks Tschernobyl

Sämtliche Reaktorblöcke des Kernkraftwerks sind seit Dezember 2000 stillgelegt. Allerdings sollte nach dem Unfall der dem Block 4 benachbarte Block 3 weiter betrieben werden. Innerhalb von nur sechs Monaten erfolgte daher von Mai bis Oktober 1986 die Errichtung eines so genannten Sarkophags, um das radioaktive Inventar des zerstörten Reaktorblocks einzuschließen (siehe Abb. 2.6).



Abbildung 2.6: Der 1986 errichtete Sarkophag um Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl [DTI03].

Hierzu wurde auf der stark zerstörten nördlichen Seite eine 50 m hohe Wand aus Betonkaskaden und auf der weitestgehend intakten Westseite eine Stahlhohlwand errichtet [Min01]. Offene Durchbrüche und Versorgungsleitungen zum ursprünglich von den Blöcken 3 und 4 gemeinsam genutzten Hilfsanlagengebäude wurden getrennt und verschlossen. Als Dach wurde eine Stahlkonstruktion mit Stahlträgern und Stahlrohren, sowie Stahl- und Fertigbetonplatten als Abdeckung errichtet. Ein hermetischer Abschluss des Sarkophags wurde nicht erreicht, es existieren heute Öffnungen mit einer Fläche von insgesamt etwa 1000 m^2 [Bot00].

Aus diesem und einigen anderen Gründen, so ist z. B. Wasser eingetreten⁸ und die Dachkonstruktion vom Einsturz bedroht, wird der Bau einer bogenförmigen Halle über dem bestehenden, mangelhaften Sarkophag geplant, dessen Realisierung wahrscheinlich, aber noch nicht ganz sicher erscheint [Mew04] (siehe Abb. 2.7).

Mit der Halle soll der unkontrollierte Austritt radioaktiver Aerosole sowie der Wassereintritt in das Reaktorgebäude verhindert werden. Der Neubau soll zudem erdbebensicher sein und Wind- und Schneelasten standhalten können. Das aus internationalen Kooperationen entstandene Konzept sieht eine zweischichtige Stahlrohrkonstruktion vor [Min01]. Die Innenschicht aus verschweißten Edelstahlblechen ist zur Aufrechterhaltung eines Unterdrucks in der Halle vorgesehen, die Außenschicht aus Trapezblech zur Abdichtung gegen natürliche Einflüsse. Der Rückbau des alten Sarkophages nach Fertigstellung der Halle wird in Erwägung gezogen.

⁸Durch die Moderatorwirkung von Wasser besteht bei Wassereintritt die Gefahr einer erneuten Kritikalität. So zeigten Messungen in den Jahren 1990 und 1996 bereits Anzeichen von Kettenreaktionen in der geschmolzenen Kernmasse [Bot00].


Abbildung 2.7: Entwurf der geplanten Neukonstruktion [DTI03].

Die heutige Situation in der nördlichen Ukraine

Ein bedeutsames Problem stellt heute die illegale Wiederbesiedlung der Zone II dar. Seit 1995 gibt es eine stetige Rückkehr ehemaliger Bewohner in diese Zone. Dabei handelt es sich insbesondere um Menschen, die mit der ihnen in den Jahren 1986/89 zur Verfügung gestellten neuen Lebensumgebung nicht zufrieden waren. Diese Wiederbesiedlung wird von staatlicher Seite toleriert. Zudem bewohnen einige nie evakuierte Menschen die Zone II.

Für eine Beurteilung, inwieweit die Besiedlung dieser Zone II auch wieder offiziell erfolgen kann, ist eine Abschätzung der Strahlenexposition durch die dosisrelevantesten Nuklide ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr und Plutoniumisotope notwendig. Für ¹³⁷Cs ist dies bereits in einigen Arbeiten des ZSR dokumentiert [Bel98] [Bot00], und ist auch Thema dieser Arbeit. Auch für ⁹⁰Sr liegt bereits eine Arbeit aus dem ZSR vor [Mew04].

2.5 Nachweis von γ -Strahlung mit Halbleiterdetektoren

2.5.1 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie

Es gibt eine grosse Anzahl bekannter Wechselwirkungen von Gammastrahlung mit Materie. Nur drei davon spielen allerdings eine entscheidende Rolle für die Gammaspektrometrie: der Photo-, der Compton- und der Paarbildungseffekt. Diese Wechselwirkungen zeichnen sich dadurch aus, dass ein betrachtetes Gammaquant durch sie entweder gänzlich verschwindet oder eine Streuung mit großem Streuwinkel erfährt. Damit unterscheiden sich die für die Gammaspektrometrie relevanten Wechselwirkungen von den häufig in Bezug auf Alpha- bzw. Betastrahlung diskutierten, bei denen die Heliumkerne bzw. Elektronen oder Positronen durch vielfache Wechselwirkungen mit mehreren absorbierenden Atomen kontinuierlich abgebremst werden.

Photoeffekt

Beim Photoeffekt wechselwirkt ein Photon derart mit einem Atom, dass es seine gesamte Energie E_{γ} an ein mit der Bindungsenergie E_B an das Atom gebundenes Elektron abgibt, welches für den Fall $E_{\gamma} > E_B$ mit der Energie

$$E_e = E_\gamma - E_B$$

von dem Atom emittiert wird. Aus Gründen der gleichzeitigen Energie- und Impulserhaltung kann der Photoeffekt nicht an freien Elektronen stattfinden, da das Atom einen Teil des Impulses aufnehmen muss, also einen Rückstoss erfährt [Dem98].

Das emittierte Elektron kommt in der Regel aus einem stark gebundenen Zustand, d. h. aus der K-, L- oder M-Schale. Diese freie Stelle hat in den meisten Fällen eine Fluoreszenz des Atoms im Röntgenbereich zur Folge.

Für den Wirkungsquerschnitt τ des Photoeffekts in Abhängigkeit von E_{γ} und der mittleren Kernladungszahl Z des Absorbers lässt sich keine analytische Beziehung angeben, allerdings gilt für $E_{\gamma} > E_B(K)$, wobei $E_B(K)$ die Bindungsenergie für Elektronen der K-Schale ist, die empirische Abschätzung [Kno99] [DH88]

$$\tau \propto \frac{Z^n}{E_{\gamma}^{3,5}} \quad \text{mit} \quad 4 \le n \le 5.$$
(2.9)

Im niederenergetischen Bereich kommt es zu Unstetigkeiten der Funktion $\tau = \tau(E_{\gamma})$, von denen die höchste bei $E_{\gamma} = E_B(K)$ liegt. Ab dieser Energie ist E_{γ} gerade groß genug, um die Emission eines K-Elektrons zu bewirken. Weitere Unstetigkeiten liegen bei den zu anderen Schalen gehörigen Bindungsenergien $E_B(L)$, $E_B(M)$ usw.

Compton-Effekt

Im Falle des Compton-Effekt wird ein einfallendes Photon, das im Folgenden Compton-Photon genannt wird, an einem Elektron des absorbierenden Materials, das im Folgenden Compton-Elektron genannt wird, um einem Winkel θ gestreut. Dabei kann das einfallende Compton-Photon mit der Energie E_{γ} an das Compton-Elektron, für das angenommen wird, dass es vor der Streuung in Ruhe war, die Energie E_e abgeben, für die

$$0 \le E_e \le E_{e,\max}$$

gilt. Hierbei ist $E_{e,\max}$ die maximale Energie, die das Compton-Elektron aufnehmen kann. E_e steht über $E_{\gamma} = E_e + E'_{\gamma}$ mit E_{γ} und E'_{γ} , der Energie des ausfallenden Photons, in Beziehung. Um E'_{γ} in Abhängigkeit von E_{γ} und der Energie $m_e c^2 = 511$ keV des ruhenden Compton-Elektrons auszudrücken, nimmt man an unter Vernachlässigung der relativ kleinen Bindungsenergie des Compton-Elektrons an, dass das Compton-Photon mit einem freien Elektron wechselwirkt und verwendet Viererimpulserhaltung:

$$P'_{e} = P_{\gamma} + P_{e} - P'_{\gamma}, \tag{2.10}$$

wobei P_{γ} bzw. P_e die Viererimpulse von Compton-Photon bzw. -Elektron vor der Streuung und P'_{γ} bzw. P'_e die Viererimpulse nach der Streuung bezeichnen. Fällt das Compton-Photon in x-Richtung ein und liegt die zu θ gehörige Drehachse in z-Richtung, so sind P_{γ} und P'_{γ} leicht auszurechnen und mit der Annahme eines zunächst ruhenden Compton-Elektrons nimmt auch P_e eine sehr einfache Form an, so dass aus (2.10) folgt⁹:

$$P'_{e} = \begin{pmatrix} E_{\gamma}/c \\ E_{\gamma}/c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_{e}c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} E'_{\gamma}/c \\ \cos(\theta) \cdot E'_{\gamma}/c \\ \sin(\theta) \cdot E'_{\gamma}/c \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{e}c + (E_{\gamma} - E'_{\gamma})/c \\ E_{\gamma}/c - \cos(\theta) \cdot E'_{\gamma}/c \\ -\sin(\theta) \cdot E'_{\gamma}/c \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Mit $P_e^{\prime 2} = m_e^2 c^2$ ergibt sich dann:

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

Für $E'_{\gamma,\min} = E_{\gamma} - E_{e,\max}$ gilt offensichtlich:

$$E'_{\gamma,\min} = E'_{\gamma}(\theta = \pi) = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{2E_{\gamma}}{m_e c^2}} > 0.$$
 (2.11)

Für $\theta \approx 0$ ist hingegen $E'_{\gamma} \approx E_{\gamma}$.

Für den Wirkungsquerschnitt σ des Compton-Effekts gilt [Kno99]

$$\sigma \propto \frac{Z}{E_{\gamma}}.\tag{2.12}$$

Die lineare Abhängigkeit von der Kernladungszahl Z lässt sich leicht dadurch erklären, dass die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit von der Anzahl der als Streutarget in Frage kommenden Hüllelektronen abhängt.

Der Compton-Effekt sorgt in Gammaspektren für den so genannten Compton-Untergrund, der sich kontinuierlich über den gesamten Energiebereich solcher Spektren erstreckt und bei der Auswertung zu berücksichtigen ist (siehe Abschnitt 3.3.2). Zu diesem Untergrund tragen einerseits die Compton-Elektronen bei, deren Energie aus dem Intervall $[0, E_{e,\max}]$ im Detektor absorbiert wird. Die scharfe "Compton-Kante" bei der Energie $E_{e,\max}$ ist aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens des Detektors als verschmierter Peak sichtbar. Andererseits können auch die gestreuten Photonen mit Energien in $[E'_{\gamma,\min}, E_{\gamma}]$ mit dem Kristall wechselwirken. Handelt es sich dabei um einen Photoeffekt, so trägt der Summenpuls aus Compton-Elektron und Photon zum Photopeak der Energie E_{γ} bei. Kommt es hingegen erneut zu einem Compton-Effekt und verlässt das gestreute Photon anschließend den Kristall, so wird ein Zählereignis zu einer Energie kleiner als E_{γ} registriert. Desweiteren können mit umgebenden Materialien über den Compton-Effekt wechselwirkende Photonen zurück gestreut werden und bewirken so einen Rückstreupeak in der Nähe der Energie $E'_{\gamma,\min}$, da diese Energie gemäß (2.11) gerade einem Streuwinkel π entspricht.

⁹Für einen Viererimpuls P eines freien Teilchens mit der Geschwindigkeit \mathbf{v} , der Masse $m \neq 0$ und der Energie E gilt $P = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \cdot (mc, m\mathbf{v}) = \left(E/c, (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \cdot m\mathbf{v}\right)$, sowie demzufolge $P^2 = m^2 c^2$ [Dra04].

2 Grundlagen

Paarbildungseffekt

Für $E_{\gamma} > 2m_ec^2 = 1022 \,\text{keV}$ ist auch der so genannte Paarbildungseffekt energetisch möglich. Dabei entsteht im Coulomb-Feld des Atomkerns aus dem Gammaphoton ein Elektron-Positron-Paar, wobei die kinetische Energie von Elektron und Positron $E_{\gamma} - 2m_ec^2$ beträgt. Dabei nimmt aus Gründen der gleichzeitigen Energie- und Impulserhaltung der Atomkern einen Rückstoß auf [Dem98].

Durch Annihilation des Positrons entstehen zwei Photonen mit jeweils einer Energie von 511 keV. Diese Photonen werden zum Teil vom Detektor nachgewiesen, womit durch diesen Effekt Photopeaks bei 511 keV und 1022 keV im Gammaspektrum bewirkt werden. Zusätzlich entstehen zu einer Gammalinie der Energie E_{γ} gehörige Peaks bei den Energien $E_{\gamma} - 511$ keV und $E_{\gamma} - 1022$ keV. Die erstgenannte Linie entsteht, wenn eines der Annihilationsphotonen den Detektor ohne Wechselwirkung verlässt ("Single Escape Peak"), die letztgenannte, wenn dies für beide Photonen der Fall ist ("Double Escape Peak").

Für den Wirkungsquerschnitt κ des Paarbildungseffekts gilt für nicht zu hohe Energien näherungsweise:

$$\kappa \propto Z^2 \ln E_{\gamma}.\tag{2.13}$$

Bei sehr hohen Energien $E_{\gamma} \gg m_e c^2$ wird $\kappa(E_{\gamma}) \approx \text{konst.}$ [Dem98].

Für Energien bis zu einigen MeV ist κ sehr klein, so dass der Paarbildungseffekt erst ab etwa 10 MeV gegenüber Photo- und Compton-Effekt dominiert.

Abb. 2.8 stellt die drei betrachteten Effekte in ihrer Bedeutung für die relevanten Bereiche von Z und E_{γ} gegenüber.



Abbildung 2.8: Relative Bedeutung von Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt für verschiedene Z und relevante Bereiche von E_{γ} [Kno99]. Die beiden Linien stehen für solche Tupel (Z, E_{γ}) , für die die jeweils benachbarten Effekte gleich wahrscheinlich sind.

Linearer Schwächungskoeffizient und Massenschwächungskoeffizient

Mit (2.9), (2.12) und (2.13) lässt sich nun die Gesamtwahrscheinlichkeit μ pro Wegstrecke berechnen, dass ein Gammaphoton auf dem Weg von der Quelle zum Detektor absorbiert oder gestreut wird:

$$\mu = \frac{\rho N_A}{A} (\tau + \sigma + \kappa). \tag{2.14}$$

 ρ ist die Dichte des absorbierenden Materials, N_A die Avogadro-Konstante und A die Kernmasse in der atomaren Masseneinheit u. Dann ist A/N_A die Kernmasse in Masseneinheiten und $\rho N_A/A$ die Anzahl der Kerne im absorbierenden Material pro Volumeneinheit.

 μ wird auch *linearer Schwächungskoeffizient* genannt. Mit den Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten pro Wegstrecke für die einzelnen betrachteten Effekte,

$$\mu_{\lambda} = \frac{\rho N_A}{A} \cdot \lambda, \ \lambda \in \{\tau, \sigma, \kappa\},\$$

vereinfacht sich μ zu $\mu = \sum_{\lambda} \mu_{\lambda}$. Der so genannte *Massenschwächungskoeffizient* μ_m ist definiert über

$$\mu_m := \mu/\rho. \tag{2.15}$$

 μ_m lässt sich demnach auch wie folgt schreiben:

$$\mu_m = \frac{N_A}{A} \sum_{\lambda} \lambda = \sum_{\lambda} \frac{\mu_{\lambda}}{\rho} =: \sum_{\lambda} \mu_{m,\lambda}.$$

Abb. 2.9 zeigt am Beispiel von Natriumiodid die Energieabhängigkeit von μ_m und der $\mu_{m,\lambda}$. Man beachte hierbei, dass in dieser Abbildung die $\mu_{m,\lambda}$ mit λ/ρ gekennzeichnet sind.

In Abb. 2.9 ist neben den drei bisher besprochenen Effekten auch die Rayleigh-Streuung eingezeichnet. Dabei wechselwirkt das Photon kohärent mit allen Elektronen eines Atoms. Dadurch wird keine Anregung oder Ionisierung des Atoms bewirkt und das Photon behält seine ursprüngliche Energie, ändert jedoch seine Richtung. Die praktische Bedeutung der Rayleigh-Streuung ist allerdings verhältnismäßig gering, da die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit nur für geringe Energien und große mittlere Kernladungszahlen Z hoch genug ist. Zudem wird der Winkel um den das Photon gestreut wird, mit steigender Energie kleiner.



Abbildung 2.9: Energieabhängigkeit der Massenschwächungskoeffizienten bei Natriumiodid [Kno99].

2.5.2 Detektorsysteme

Messsysteme mit Reinst-Germanium-Halbleiterdetektoren

Die in dieser Arbeit angewandte Halbleiter-Gammaspektrometrie ist nur eine von vielen Methoden um ionisierende Strahlung im allgemeinen und Gammastrahlung im besonderen nachzuweisen. Im Rahmen der Untersuchung der Folgen des Unglücks von Tschernobyl werden bei den spektrometrischen Verfahren unter anderem auch der Flüssig-Szintillationsspektrometrie für Betastrahlung zur Messung von ⁹⁰Sr und der Alphaspektrometrie für z. B. Plutonium eine besondere Bedeutung zuteil. Die Halbleiter-Gammaspektrometrie besitzt diesen Methoden gegenüber den großen Vorteil, dass die Probenaufbereitung vergleichsweise weniger zeitaufwendig ist, da in der Regel keine chemischen Trennverfahren angewendet werden müssen. Nachteilig sind hingegen die im Vergleich höheren Nachweis- und Erkennungsgrenzen (siehe Abschnitt 3.3.3) [Vah04b].

Für diese Arbeit wurden nur Reinst-Germanium-Halbleiterdetektoren¹⁰ als Strahlungsdetektoren verwendet. Germanium zeichnet sich gegenüber Silizium durch seine höhere Ordnungszahl und der dementsprechend gemäß (2.9) höheren Wechselwirkungswahrscheinlichkeit für den Photoeffekt, aus.

Abb. 2.10 zeigt eine schematische Darstellung des verwendeten Messaufbaus.



Abbildung 2.10: Schematische Darstellung eines Messsystems mit HPGe-Detektor.

Ein Germanium-Halbleiterdetektor wird prinzipiell als Diode in Sperrrichtung betrieben. Das Kernstück des Messsystems, der Halbleiterkristall, ist ein je nach Detektor unterschiedlich geformter Kristall aus Reinst-Germanium mit mittlerweile realisierbaren Reinheiten von weniger als 10⁹ Fremdatomen pro cm³ [Kno99]. Man unterscheidet die Detektoren, je nachdem, ob es sich bei den vorhandenen Störstellen um Akzeptoren oder Donatoren handelt, in π -type- (für einen Detektor mit einem p-Halbleiter als Kristall) und ν -type-Detektoren (für einen Detektor mit einem n-Halbleiter als Kristall).

An den eigentlichen Detektorkristall müssen jeweils ein n⁺- und ein p⁺-Kontakt¹¹ angebracht werden. Im Falle eines π -type-Detektors übernimmt der n⁺-p-Übergang die Gleichrichtung, bei einem ν -type-Detektor ist es der p⁺-n-Übergang. Dringt nun ein Gammaphoton in den Kristall ein, so werden Elektron-Loch-Paare gebildet, deren Anzahl proportional zur primären Energie des Photons ist. Trotz der Energiedifferenz von nur 0,67 eV zwischen Valenz- und Leitungsband bei Germanium, wird hierbei pro Elektron-Loch-Paar eine Energie von 2,96 eV benötigt, da auch Energie an das phononische System des Kris-

¹⁰Als Abkürzung wird auch der Begriff *HPGe*-Detektor für *High Purity Germanium*-Detektor benutzt.

 $^{^{11}\}mathrm{Die}$ Bezeichnungen n $^+$ und p $^+$ stehen für besonders stark entsprechend dotierte Halbleiter.

talls abgegeben wird.¹² Damit werden aber pro Energieverlust immer noch wesentlich mehr Ladungsträger erzeugt als z. B. in einer Ionisationskammer, was die deutlich höhere Energieauflösung der Halbleiterdetektoren erklärt.

Die erzeugten Elektron-Loch-Paare werden durch die angelegte Sperrspannung über der p-n-Grenzschicht getrennt und an den Elektroden gesammelt. Die Sammelzeit beträgt typischerweise 10–100 ns [Dem98], was die Schnelligkeit und gute Zeitauflösung der Halbleiterdetektoren begründet.

Die Sperrspannung wird so gewählt, dass – im Falle eines π -type-Detektors und entsprechend für ν -type-Detektoren – der n⁺-Kontakt auf einem höheren Potential liegt als der p⁺-Kontakt und die an Ladungsträgern verarmte Zone, das so genannte *aktive Volumen* des Detektors, sich über den gesamten Kristall erstreckt. In der Regel wird sogar eine höhere Spannung eingestellt, als dafür notwendig, um bereits mit dem minimalen elektrischen Feld im Kristall die Sättigungsdriftgeschwindigkeit der Ladungsträger zu erreichen und so die Sammelzeit zu minimieren.¹³

Die an den Elektroden gesammelten Ladungsträger bewirken dann in dem Vorverstärker einen Ladungsimpuls, der dort in einen Spannungsimpuls umgewandelt und verstärkt wird. Eine weitere Verstärkung des Spannungsimpulses und eine Pulsformung wird durch den linearen Hauptverstärker vorgenommen. Ein Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert das Signal und ein Vielkanalanalysator (Multi Channel Analyzer, MCA) mit Pufferspeicher ordnet die zur Energie des Gammaphotons proportionale Pulshöhe einem von 4096 Kanälen zu. Die weitere Datenverarbeitung kann dann mit einem PC erfolgen.

Je nach Form des Halbleiterkristalls unterscheidet man zwischen planaren und koaxialen HPGe-Detektoren, was im Folgenden erläutert werden soll.

Planare HPGe-Detektoren

Der Kristall eines planaren HPGe-Detektors ist zylinderförmig (Abb. 2.11), mit einem üblichen Durchmesser von wenigen Zentimetern. Die notwendigen n⁺- bzw. p⁺-Kontakte sind auf den beiden Grundflächen aufgebracht.

Der n^+ -Kontakt kann dabei durch Evaporation und Diffusion von Lithium auf eine der Grundflächen des Wafers erfolgen oder anhand eines Beschleunigers durch die direkte Implantation von Donatoratomen. Problematisch bei letztgenannter Methode ist der Umstand, dass Strahlenschäden Akzeptoren im Germanium erzeugen können. Die meisten dieser Kontakte werden daher durch die Diffusion von Lithium erzeugt, wobei allerdings in Kauf genommen werden muss, dass eine dickere Kontaktschicht (Oberflächen-Totschicht)

¹²Die angegebenen Energien beziehen sich auf eine übliche Betriebstemperatur von 77 K, die zur Minimierung der Leckströme durch die mit steigender Temperatur wachsende intrinsische Leitfähigkeit des Halbleiters aufrecht erhalten werden muss. Diese Kühlung wird durch flüssigen Stickstoff sichergestellt.

¹³Bei einer Temperatur von 77 K wird in Germanium ab einer elektrischen Feldstärke von 10⁵ V m⁻¹ die Sättigungsdriftgeschwindigkeit der Elektronen erreicht [Kno99]. Zum Erreichen der Sättigungsdriftgeschwindigkeit der Löcher sind drei- bis fünfmal höhere Feldstärken notwendig. Um aber u. a. die Spitzensperrspannung nicht zu überschreiten und somit einen Durchbruch der in Sperrrichtung betriebenen Diode zu verhindern, beschränkt man sich in der Regel auf Sperrspannungen von 3–5 kV, bei denen zwar die Sättigungsdriftgeschwindigkeit der Elektronen, nicht aber die der Löcher erreicht wird.



Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines planaren HPGe-Detektors [Kno99].

als mit der Implantationstechnik entsteht. Diese Totschicht kann nicht zum aktiven Volumen gezählt werden und schirmt die einfallende Strahlung zu einem gewissen Grad ab. Mit der Implantationstechnik ist es möglich, Totschichtdicken von weniger als einem Mikrometer zu erzielen, wohingegen bei der Diffusion von Lithium mit Dicken von einigen hundert Mikrometern zu rechnen ist [Kno99]. Eine dickere Totschicht verringert die Durchlässigkeit für niederenergetische Gammastrahlung mit vergleichsweise geringem Durchdringungsvermögen, für Gammastrahlung mit Energien über 200 keV kann der Effekt jedoch in der Regel vernachlässigt werden [Kno99].

Der p⁺-Kontakt kann relativ einfach und mit dünnen Totschichten durch die Implantation von Akzeptoren, oder auch eine Metallschicht als elektrischem Äquivalent, realisiert werden.

Die maximale Tiefe der Verarmungszone kann 1–2 cm nicht übersteigen, so dass ein größeres aktives Volumen als 10–30 cm³ mit dieser Kristallform nicht erreichbar ist [Kno99]. Damit eignen sich planare HPGe-Detektoren zwar kaum zum Nachweis von Gammastrahlung höherer Energie, stellen aber aufgrund ihrer dünnen Totschicht für niederenergetische Gammastrahlung, wie z. B. die der 46,54 keV-Linie des ²¹⁰Pb, die Methode der Wahl dar.

Koaxiale HPGe-Detektoren

Aktive Volumen von bis zu $750 \,\mathrm{cm}^3$ können mit koaxialen HPGe-Detektoren realisiert werden [Kno99]. Da sich diese Detektoren somit wesentlich besser als planare Detektoren für den Nachweis auch von Gammastrahlung höherer Energie eignen, wurden sie ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Eine Zusammenstellung der technischen Daten der eingesetzten Detektoren findet sich in Tabelle A.3 auf Seite 146.

Koaxiale HPGe-Detektoren bestehen aus einem langen, zylindrischen Germanium-Kristall. Eine der beiden Elektroden wird auf der äußeren Mantelfläche des Zylinders aufgebracht. Durch Entkernen des Zylinders kann der zweite Kontakt auf die innere zylindrische Fläche aufgebracht werden. Für den gleichrichtenden Kontakt kann dabei im Prinzip sowohl die Innen- als auch die Außenseite gewählt werden. Üblicherweise wird jedoch nur letzteres realisiert. Einer der Vorteile ist die geringere Spannung, die notwendig ist, um die Verarmungszone auf den gesamten Kristall auszuweiten.

Für eine schematische Darstellung der Querschnitte koaxialer π - und ν -type-Detektoren siehe Abb. 2.12.

2 Grundlagen



Abbildung 2.12: Schematische Querschnitte koaxialer HPGe-Detektoren [Kno99].

3 Experimentelles

3.1 Probenaufbereitung

3.1.1 Allgemeines

Vor dem Transport nach Deutschland wurden alle Proben in der Ukraine in kleine Plastiktüten verpackt. Die Materialmenge pro Probe war im allgemeinen nicht besonders groß und betrug höchstens einige hunderte Gramm. Von einigen Materialien waren zum Teil auch nur weniger als 50 g pro Probe vorhanden. Diese verhältnismäßig geringen Mengen stellen für die Probenaufbereitung ein Problem dar, da zwar einerseits zur Erzeugung vernünftiger Messgeometrien weitere Gewichtsreduzierungen durch Trocknung und Dichtereduzierungen durch Homogenisierung notwendig sind, andererseits aber beachtet werden muss, dass sich am Ende des Aufbereitungsprozesses noch geeignete Messbehältnisse finden, also noch genug Material vorhanden ist, um mindestens eine kleine Petrischale auszufüllen. Daher konnten anders als beispielsweise in [Vah04b] nur größere tierische Proben verascht werden.

Sämtliche Proben wurden nach der Aufbereitung, die entweder Gefriertrocknung, Trocknung oder Veraschung und ggf. Mahlen beinhaltete, mit Hilfe einer mechanischen Presse in Petrischalen gepresst. Je nach vorhandener Materialmenge wurden Petrischalen mit einem Durchmesser von 53 mm und einer Höhe von 13 mm (Abkürzung: ,P5'), oder solche mit einem Durchmesser von 85 mm und einer Höhe von 14 mm (,P10') verwendet.

Die Petrischalen wurden schließlich mit Hart-Plastikkleber sorgfältig verschlossen, um einen möglichst gasdichten Abschluss zu erzeugen und den Austritt von Probenmaterial zu verhindern.

3.1.2 Milch

Die Milchproben wurden bereits gefriergetrocknet aus der Ukraine geliefert und im ZSR vor der weiteren Aufbereitung in einem Kühlschrank gelagert. Es war jedoch unsicher, inwieweit das an der SUAEU angewandte Gefriertrocknungsverfahren vollständig ist. Zudem konnte nicht ausgeschlossen werden, dass einige oder alle Proben durch undichte Tüten nach der Trocknung in der Ukraine wieder etwas Wasser aufgenommen hatten. Aus diesen Gründen wurden die im Rahmen dieser Arbeit vermessenen Milchproben erneut gefriergetrocknet. Die Trocknung wurde stets bei Erreichen der Gewichtskonstanz beendet.

Dabei konnte die Masse der Proben um 1,3-5,1% reduziert werden. Im arithmetischen Mittel betrug der Massenverlust durch Gefriertrocknung 3,2%.

Die Milchproben wurden nach der Gefriertrocknung direkt in Petrischalen P10 gepresst.

3.1.3 Käse

Vier Käseproben mit der Bezeichnung "Körniger Frischkäse" lagen tiefgekühlt, aber ansonsten unbehandelt vor. Diese Proben wurden wie auch die Milchproben bis zur Gewichtskonstanz gefriergetrocknet. Der Massenverlust von Frischmasse zu Trockenmasse betrug 68,8-74,1% und im arithmetischen Mittel 70,9\%.

Anschließend konnte das poröse Material mit handelsüblichem Küchenbesteck pulverisiert und somit auch homogenisiert werden. Die von der Konsistenz den Milchproben dann sehr ähnlichen Käseproben wurden in Petrischalen P10 gepresst.

3.1.4 Beeren

Die Beerenproben lagen als ganze Früchte in tiefgekühlter und getrockneter Form vor. Das Material wurde per Gefriertrocknung bis zur Gewichtskonstanz nachgetrocknet. Der Massenverlust dadurch betrug 3,8-7,9% sowie im arithmetischen Mittel 6,6%.

Die Beeren wurden anschließend mit einer Küchenmaschine zu einem Pulver zermahlen, welches je nach vorhandener Materialmenge in Petrischalen P5 oder P10 gepresst wurde.

3.1.5 Tierische Fleisch-, Organ- und Knochenproben

Sämtliche Proben aus dieser Kategorie lagen unzerkleinert und tiefgekühlt vor. Falls genug Material vorlag, so dass zu erwarten war, dass nach einer Veraschung noch genug Masse vorhanden wäre, um zumindest das Volumen einer Petrischale P5 auszufüllen, wurde diese Methode gewählt. Bei vier Schweinenieren, einer Wildschweinniere, einer Rehniere und einer Schweineleber war dies nicht der Fall, so dass diese Proben in kleine Würfel geschnitten und anschließend bis zur Gewichtskonstanz gefriergetrocknet wurden. Der Massenverlust hierbei betrug 66,5-76,4% und im arithmetischen Mittel 71,3\%. Danach wurden die Stücke mit einer Küchenmaschine zu einem Pulver weiterverarbeitet und anschließend je nach vorhandener Masse in Petrischalen P10 oder P5 gepresst.

Für die Veraschung der übrigen Tierproben wurde folgendes Temperaturprogramm gewählt:

- Beginn der Veraschung bei $100\,^{\circ}\mathrm{C}$
- Temperaturerhöhung auf 240 °C in 24 Stunden
- Temperaturerhöhung auf 260 °C in einer Stunde
- Verbleiben bei 260 °C für 24 Stunden
- Temperaturerhöhung auf 300 °C in drei Stunden
- Verbleiben bei 300 °C für 12 Stunden
- Temperaturerhöhung auf 350 °C in drei Stunden
- Verbleiben bei 350 °C für 12 Stunden

- Temperaturerhöhung auf 400 °C in drei Stunden
- Verbleiben bei 400 °C für 24 Stunden

Bis zu einer Temperatur von etwa $300\,^{\circ}$ C wurde für eine Stickstoffatmosphäre im Veraschungsofen gesorgt. Nach dem Erreichen dieser Temperatur wurde die Belüftung des Ofens eingeschaltet.

Das Temperaturprogramm orientiert sich an dem Programm, welches in [Mes00] für die Veraschung von Fischen vorgeschlagen wird. Die langsame Temperaturerhöhung minimiert in Verbindung mit der Stickstoffatmosphäre das Risiko eines Brandes, welches insbesondere bei fettreichen Proben nicht zu vernachlässigen ist.

Ein Veraschungsvorgang mit einer Maximaltemperatur von 400 °C ist nicht vollständig, eine weisse Asche kann also nicht erzeugt werden. Dies behindert das Messverfahren der Gammaspektrometrie jedoch nicht und war in diesem Fall notwendig, da ab Temperaturen von etwa 400 °C mit der teilweisen Verflüchtigung des Cäsiums zu rechnen ist.

Die für die Veraschung verwendeten Schalen wurden mit zwei Lagen Transparentpapier ausgelegt. Dadurch wird ein "Anbacken" der Asche an der Schale verhindert, so dass die Ascheentnahme quantitativ ist [Mes00]. Der Aschegehalt des Papiers kann dabei vernachlässigt werden.

Bei Muskeln und Organen betrug der Massenverlust durch die Veraschung 97,1–98,4 % und im arithmetischen Mittel 97,8 %. Bei Knochen und Kiefern mit Zähnen wurde die Masse um 56,1–79,4 %reduziert.

Knochen und Kiefer mit Zähnen waren im Gegensatz zu den anderen Materialien nach der Veraschung noch sehr fest und mussten zunächst mit einem Mörser zerkleinert werden. Alle Proben wurden schließlich mit einer Küchenmaschine zu einem feinen Pulver weiterverarbeitet. Dieses Pulver wurde dann je nach vorhandener Menge in Petrischalen P10 oder P5 gepresst.

3.1.6 Bodenproben

Bodenproben lagen in vorgetrockneter und unterschiedlich sorgfältig zerkleinerter Form vor. Zum Teil waren noch Steine oder deutlich sichtbare organische Bestandteile, wie z. B. Wurzelmaterial enthalten.

Die Proben wurden in einem Trockenschrank bei $105 \,^{\circ}$ C bis zur Gewichtskonstanz nachgetrocknet (siehe Tabelle 3.1). Nach der anschließenden Entfernung von sichtbaren Steinen und organischen Bestandteilen sowie der Zerkleinerung und Homogenisierung des Probenmaterials mit einer Küchenmaschine, wurden danach noch enthaltene größere Bestandteile mit einem Sieb der Maschenweite 2 mm entfernt. Bei allen Bodenproben war genug Material vorhanden, um das Volumen einer Petrischale P10 auszufüllen.

3.1.7 Sonstige Proben

Die sonstigen Proben, bei denen es sich um organische Materialien wie unter anderem Weide- und Wiesenbewuchs, Getreide und Pilze handelte, lagen vorgetrocknet und grob zerkleinert vor. Die Nachtrocknung bis zur Gewichtskonstanz erfolgte, wie auch bei den Bodenproben, im Trockenschrank bei 105 °C (siehe Tabelle 3.1). Das verbliebene Material wurde anschließend mit einer Küchenmaschine zerkleinert, wodurch in der Regel ein recht feines Pulver erzeugt werden konnte. Als Messbehältnisse fanden, je nach vorhandener Materialmenge, Petrischalen P10 und P5 Verwendung.

Material	Bereich	Ar. Mittel
Böden	0,2%-41,1 $%$	$_{3,8\%}$
Gras	$5,9\%{-}11,5\%$	$^{8,2\%}$
Heu	$6{,}6\%{-}9{,}1\%$	$7{,}6\%$
Pilze	$4{,}1\%{-}10{,}9\%$	7,7%
OA u. Pilzen	$1{,}1\%{-}15{,}4\%$	$^{8,3\%}$
OA u. Beeren	8,9%–12,1 $%$	$_{10,2\%}$
Getreide	$9{,}1\%{-}14{,}8\%$	$12,\!4\%$
Wurzelgemüse	$6{,}7\%{-}12{,}7\%$	$_{9,2\%}$
Blattgemüse	$9,6\%{-}13,1\%$	$11,\!4\%$

Tabelle 3.1: Massenverluste bezogen auf das Ausgangsgewicht (\neq Feuchtgewicht) durch Nachtrocknung im Trockenschrank für einige Probenmaterialien.

3.2 Nulleffekt und Kalibrierungen

3.2.1 Nulleffekt

Ein wichtiger Aspekt der Gammaspektrometrie ist die regelmäßige Bestimmung des Nulleffektes für alle verwendeten Detektoren. Dies ist zum einen für die Aktivitätsbestimmung bei natürlichen Radionukliden wie ⁴⁰K notwendig, dient aber zum anderen auch dazu, mögliche Kontaminationen des Detektors, z. B. durch ¹³⁷Cs aus undichten Messbehältnissen, zu erkennen (siehe Abschnitt 3.5.2).

In [Kno99] werden die folgenden möglichen Quellen für die Untergrundstrahlung genannt:

- Natürliche Radionuklide in den Detektormaterialien.
- Natürliche Radionuklide in der unmittelbaren Detektorumgebung (Hilfsgeräte und -ausrüstung, Detektorabschirmung).
- Strahlung terrestrischen Ursprungs und aus Baumaterialien.
- Strahlung aus der Umgebungsluft des Detektors.
- Primäre und sekundäre Komponenten der kosmischen Strahlung.

Um Strahlung aus der Umgebung so gut wie möglich abzuschirmen, sind sämtliche verwendeten Detektoren von Bleiburgen umgeben. Diese Bleiburgen umfassen nur Detektorkopf und Vorverstärker. Die Dewargefäße mit dem flüssigen Stickstoff zur Kühlung des Detektors befinden sich außerhalb der jeweiligen Bleiburg. Die durch den Nulleffekt erzielten Zählraten können zwar für jeden einzelnen Detektor und die im Rahmen dieser Arbeit wichtigen Nuklide als konstant angesehen werden (siehe Abschnitt 3.5.2 und [Vah04b]), unterscheiden sich aber von Detektor zu Detektor. Dies ist insbesondere in den unterschiedlichen Bleiburgen begründet. So besitzt Detektor 4 eine speziell für diesen Zweck kommerziell angefertigte Bleiburg aus besonders reinem Blei, während die der anderen Detektoren am ZSR hergestellt wurden, was in deutlich höheren Nulleffektzählraten resultiert. Dies verdeutlicht Abb. 3.1, in der einige natürliche Radionuklide gekennzeichnet sind, die man typischerweise in solchen Nulleffektspektren vorfindet.



Abbildung 3.1: Nulleffektspektren für Detektor 1 und 4. Die Messzeiten betrugen jeweils 5 Tage.

3.2.2 Energie- und Halbwertbreitenkalibrierung

Durch die Energiekalibrierung wird den Kanälen des MCA eine Energie zugeordnet. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn später bei der Auswertung des Spektrums die Nuklide andernfalls nicht zweifelsfrei unterschieden werden können. Sollen bei einer (stark mit ¹³⁷Cs kontaminierten) Probe nur der ¹³⁷Cs- und der ⁴⁰K-Peak ausgewertet werden, so ist eine präzise Zuordnung der Energie zu den MCA-Kanälen nicht unbedingt zwingend. Für die Auswertung von Kalibrierspektren mit über große Energiebereiche verteilten künstli-

3 Experimentelles

chen Radionukliden (siehe Abschnitt 3.2.3) und auch für niedrigkontaminierte Proben ist eine solche Kalibrierung allerdings sinnvoll. Dazu wählt man günstigerweise ein Spektrum mit deutlich sichtbaren Peaks sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Energien. Die Funktion der Energie in Abhängigkeit der Kanalnummer ist näherungsweise linear [Vah04b]. Daher genügen auch zwei Peaks mit einer hohen Energiedifferenz um den gesamten interessierenden Energiebereich abzudecken.

Zur Auswertung der Gammaspektren kann auch eine Kalibrierung der Halbwertbreite (FWHM) notwendig sein. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht der Fall, da eine Software verwendet wurde, bei der die Halbwertbreite manuell für jeden Peak einzeln gewählt werden muss.

3.2.3 Efficiency-Kalibrierung

Allgemeines

Die Bedeutung der Kalibrierung der Nachweiswahrscheinlichkeit oder *Efficiency* bei der Aktivitätsbestimmung durch Gammaspektrometrie ist besonders hervorzuheben. Der Begriff "Efficiency" soll hier und im Folgenden mit der so genannten *Photopeak-Efficiency* ε identifiziert werden. Sie bezieht sich immer auf eine bestimmte Probe in Verbindung mit einem bestimmten Detektor und ist definiert als Quotient der Anzahl N_{Peak} der in einem bestimmten Zeitraum in dem zur Energie E_{γ} gehörigen Photopeak detektierten Photonen und der Anzahl $N_{\text{emittiert}}$ der im selben Zeitraum aus der Probe emittierten Photonen dieser Energie:

$$\varepsilon := \frac{N_{\text{Peak}}}{N_{\text{emittiert}}}.$$

Die Efficiency ist probenabhängig, wird also auch bei Verwendung nur eines bestimmten Detektors bei Veränderung der Parameter Probenmaterial, Probendichte und Messgeometrie variieren. Streng genommen wäre daher für jede Probe einzeln die Efficiency zu bestimmen. Da dies jedoch sehr arbeitsintensiv und zeitaufwändig wäre, bedient man sich für gewöhnlich vereinfachenden Methoden und bestimmt die Efficiency nur für eine von mehreren Proben, die in Bezug auf die oben genannten Parameter näherungsweise als identisch anzusehen sind. Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung der Efficiency für ein bestimmtes Probenmaterial (z. B. Boden) in einer bestimmten Messgeometrie (z. B. Marinelli-Behälter) in Abhängigkeit der Dichte, wobei häufig ein linearer Zusammenhang erwartet werden kann. In diesem Fall bietet es sich z. B. an, die Efficiency nur für die Proben niedrigster und höchster Dichte und eine Probe mittlerer Dichte zu bestimmen.

Für die Bestimmung der Efficiency einer konkreten Probe bieten sich, je nach den speziellen Anforderungen, die das jeweilige Probenmaterial stellt, unterschiedliche Verfahrensweisen an. Gemein haben alle Methoden den Einsatz von Referenzmaterial, welches bekannte Aktivitäten bestimmter, oft künstlicher Radionuklide beinhaltet, wobei diese Nuklide häufig so ausgewählt werden, dass sie einen möglichst großen Energiebereich abdecken. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Multielementlösung QCY48 verwendet, deren genaue Spezifikationen in Tabelle B.4 auf Seite 176 zu finden sind. Mit Hilfe dieses "Standardmaterials" lassen sich für die Energien der in QCY48 enthaltenen Radionuklide die Efficiencies für die betreffende Probe bestimmen. Möchte man nun die Efficiency eines Radionuklids bestimmen, das nicht in QCY48 enthalten ist, dessen Energie aber zwischen den erhaltenen Messpunkten liegt, so kann eine Interpolation durchgeführt werden, um die Efficiency als Funktion der Energie zu erhalten. Für Energien $E_{\gamma} > 200 \text{ keV}$ liefert bereits eine einfache Funktion mit zwei Parametern a, b ausgezeichnete Resultate:

$$\varepsilon(E_{\gamma}) = a \cdot E_{\gamma}^{b}. \tag{3.1}$$

In einer doppeltlogarithmischen Darstellung ergibt dies eine Gerade

$$\ln(\varepsilon) = \alpha \ln(E_{\gamma}) + \beta$$
, mit $\alpha = b$ und $\beta = \ln(a)$.

Der gesamte mit QCY48 abgedeckte Energiebereich lässt sich mit einer in [Jäc87] vorgestellten, rein empirischen Funktion mit sechs Parametern a_1, \ldots, a_6 sehr gut beschreiben:

$$\varepsilon(E_{\gamma}) = \exp\left\{\left[a_1 + a_2\chi + a_3\chi^2\right] \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan\left[\exp\left(a_4 + a_5\chi + a_6\chi^3\right)\right] - 25\right\},\qquad(3.2)$$

wobei $\chi := \ln(E_{\gamma})$ verwendet wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde (3.2) immer dann eingesetzt, wenn auch Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen ausgewertet werden sollten. Interessierten an einem Spektrum nur die Peaks von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K, so wurde, des geringeren Zeitaufwands wegen, (3.1)verwendet.

Den typischen Verlauf der Funktion $\varepsilon(E_{\gamma})$ zeigt Abb. 3.3 auf Seite 49.

An dieser Stelle sollen zwei Methoden vorgestellt werden, bei denen Referenzmaterial eingesetzt werden kann, um die Efficiency zu bestimmen. Eine Möglichkeit ist das so genannte *Spiking*-Verfahren. Hierbei wird einer Probe Referenzmaterial zugesetzt und möglichst gleichmäßig darin verteilt, nachdem die Probe bereits gammaspektrometrisch untersucht wurde, um die Resultate mit und ohne Standardmaterial anschließend vergleichen zu können. Die gleichmäßige Verteilung der Standardlösung stellt das größte Problem dar und kann, bei hohen Qualitätsansprüchen, recht zeitaufwändig sein [Wan04]. Zudem eignet sie sich nicht für eine große Bandbreite an verschiedenen Probenarten, da man viele der Materialien nicht ohne weiteres in Bezug auf ihre stoffliche Zusammensetzung wird gruppieren können. Dies ergäbe eine hohe Anzahl an zu erstellenden Spiking-Standards, die neben dem Zeitaufwand auch einen hohen Verbrauch an kostspieliger Standardlösung zur Folge hätte.

Als Alternative wird in [Vah04b] ein anderes Verfahren zur Efficiency-Bestimmung vorgeschlagen, welches ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurde. Dieses Verfahren eignet sich nur für die Petrischalengeometrien. Aus diesem Grund, und weil häufig nur geringe Mengen Probenmaterial zur Verfügung standen, wurden im Rahmen dieser Arbeit keine anderen Messgeometrien verwendet. Das Verfahren beruht auf der Verwendung eines "Flächenstandardpräparats" und soll im Folgenden kurz "Folienmethode" genannt werden. Zur Erstellung des Flächenstandardpräparats werden für die Petrischalengeometrien P5 und P10 jeweils kreisrunde, passende Segmente aus handelsüblichem Filterpapier ausgeschnitten. Man nimmt pro Flächenstandardpräparat zwei bis drei der Filterpapiersegmente,

3 Experimentelles

legt sie übereinander und verteilt wenige Milliliter der Standardlösung möglichst gleichmäßig darauf. Nach dem Trocknen ist der so behandelte Filterpapierstapel mit Klebefolie zu versiegeln. Man erhält so ein dünnes Flächenstandardpräparat, mit dem man die Efficiency bestimmen kann, indem man eine Mittelung der Messergebnisse bei zwischen Detektorkopf und Probe liegendem Flächenstandardpräparat sowie bei über der Probe liegendem Flächenstandardpräparat durchführt.

Die Messung des direkt auf dem Detektorkopf liegenden Flächenstandardpräparats muss allerdings für jede Detektor-Flächenstandardpräparat-Kombination nur einmal durchgeführt werden und lässt sich für alle Proben der gleichen Messgeometrie verwenden. Abb. 3.2 zeigt ein solches Spektrum für Detektor 1 und ein auf die P10-Geometrie zugeschnittenes Flächenstandardpräparat.¹ Die Bezeichnung ,Compton' weist auf die Peaks hin, die den maximalen Energieübertrag auf die Compton-Elektronen gemäß (2.11) kennzeichnen. Jeder dieser Peaks bezieht sich auf einen Peak eines QCY48-Nuklids höherer Energie. Deutlich sichtbar wird zudem der Compton-Untergrund über den gesamten Energiebereich. ,DEP (⁸⁸Y)' kennzeichnet den Double Escape Peak der 1836 keV-Linie von ⁸⁸Y.



Abbildung 3.2: Mit Detektor 1 aufgenommenes Gammaspektrum eines QCY48-Flächenstandardpräparates für die P10-Geometrie (Messzeit 40 h).

Ein Überprüfung der Gleichwertigkeit der Folienmethode mit der Spiking-Methode wurde in [Vah04b] vorgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Frage der Mittelung genauer untersucht.

¹Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit vier verschiedene Flächenstandardpräparate eingesetzt: drei für die P10-Geometrie (A, B, C) und eines für die P5-Geometrie (D).

Mittelung bei der Efficiency-Bestimmung mit Flächenstandardpräparaten

Bestimmt man die Efficiency mit der Folienmethode, so ist für die beiden gemessenen Efficiencies, d.h. jeweils für das über der Petrischale liegende Flächenstandardpräparat ("Efficiency oben") und das direkt über der Detektorendkappe platzierte ("Efficiency unten"), eine Mittelung durchzuführen, die eine als repräsentativ für die betreffende Probe anzusehende "mittlere Efficiency" ergibt. Für die folgenden Betrachtungen gelten die Bezeichnungen

$$\begin{array}{lll} \varepsilon_o & : & \text{Efficiency oben} \\ \varepsilon_u & : & \text{Efficiency unten} \\ \varepsilon_m & : & \text{gemittelte Efficiency.} \end{array}$$

Für die tatsächliche Durchführung der Mittelung gibt es verschiedene Ansätze. Der gewissermassen triviale Ansatz ist die arithmetische Mittelung gemäß

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_o + \varepsilon_u}{2}.\tag{3.3}$$

Nun bezeichne x den senkrechten Abstand von der Detektorendkappe und h die Höhe der Petrischale. $\varepsilon(x)$ sei nun die auf die jeweilige Probe bezogene Efficiency in Abhängigkeit vom Abstand von der Detektorendkappe, so dass also gilt:

$$\varepsilon_o = \varepsilon(h) \quad \wedge \quad \varepsilon_u = \varepsilon(0).$$

$$\varepsilon(x) = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_u}{h} \cdot x + \varepsilon_u \tag{3.4}$$

stellt dann einen linearen Abfall der Efficiency von x = 0 bis x = h dar. (3.3) folgt aus dieser Betrachtung sowohl in dem man die halbe Höhe der Petrischale als repräsentativ für die gesamte Probe ansieht,

$$\varepsilon_m = \varepsilon(h/2),$$
(3.5)

als auch in dem man

$$\varepsilon_m = \frac{1}{h} \int_0^h dx \,\varepsilon(x) \tag{3.6}$$

ansetzt.

In vorangegangenen Arbeiten, in denen die Folienmethode angewendet wurde, wurde (zum Teil bis auf für ²⁴¹Am) für alle Nuklide des auch in jenen Arbeiten verwendeten Referenzmaterials QCY48, eine Mittelung gemäß (3.3) durchgeführt [Vah04b] [Vah04a] [Kal03] [Hoh04b] [Hoh04a].

Problematisch an dieser arithmetischen Mittelung erscheint jedoch, dass per se keine physikalischen Gründe für diesen Ansatz existieren. So gilt für so genannte narrow beam-Geometrien ein exponentieller Abfall der Anzahl der transmittierten Photonen I gemäß dem LAMBERT-BEER-Gesetz

$$I = I_0 e^{-\mu t}, (3.7)$$

wobei I_0 die Anzahl der transmittierten Photonen ohne absorbierendes Material, t die Dicke des absorbierenden Materials und μ den linearen Schwächungskoeffzient gemäß (2.14)

3 Experimentelles

bezeichnet [Kno99]. Wichtig bei dieser Betrachtung ist, dass (3.7) nur dann gilt, wenn ausschließlich Photonen aus der Quelle, die nach ihrer Emission keine Wechselwirkung erfahren haben, gezählt werden bzw. gezählt werden können und so zu I beitragen. Unter realen Bedingungen, bei der eine starke Kollimation der Gammastrahlung wie in der idealisierten Betrachtung nicht gegeben ist (*broad beam*-Geometrie), ist diese Voraussetzung in der Regel nicht erfüllt. In einer realistischeren Betrachtung muss also berücksichtigt werden, dass auch gestreute Photonen oder andere sekundäre Photonenstrahlung vom Detektor erfasst werden könnten, ohne dass anschließend noch eine Unterscheidung von der Direktstrahlung möglich ist. Das von (3.7) beschriebene I ist dann in der Regel kleiner als das tatsächlich gemessene, was üblicherweise durch einen von t und der Energie der Gammastrahlung E_{γ} abhängigen Aufbaufaktor $B(t, E_{\gamma})$ berücksichtigt wird [Kno99]:

$$I = B(t, E_{\gamma})I_0 e^{-\mu t}.$$
 (3.8)

 $B(t, E_{\gamma})$ hängt allerdings auch vom verwendeten Detektor ab, da berücksichtigt werden muss, inwiefern anhand des eingesetzten Detektors zwischen direkter und sekundärer Gammastrahlung unterschieden werden kann. Für einen Detektor, der nur für direkte Gammastrahlung empfindlich ist, gilt $B(t, E_{\gamma}) = 1$. Im vorliegenden Fall wurden Halbleiterdetektoren mit guter Energieauflösung eingesetzt, so dass nur elastische oder ausreichend annähernd elastische Streuung zu $B(t, E_{\gamma})$ beitragen kann. Daher wird als Näherung im Folgenden $B(t, E_{\gamma}) \approx 1$ angenommen.

Als zu (3.4) alternativer Ansatz kann demzufolge von

$$\varepsilon(x) = \varepsilon(0)e^{-\alpha x} \equiv \varepsilon_u e^{-\alpha x} \tag{3.9}$$

ausgegangen werden, wobei sich α aus $\varepsilon_o \equiv \varepsilon(h) = \varepsilon_u e^{-\alpha h}$ zu $\alpha = h^{-1} \cdot \ln(\varepsilon_u / \varepsilon_o)$ berechnet. Gemäß (3.5) berechnet ε_m sich dann gerade zu dem geometrischen Mittelwert aus ε_o und ε_u :

$$\varepsilon_m = \sqrt{\varepsilon_o \varepsilon_u}.\tag{3.10}$$

Legt man (3.6) zugrunde, ergibt sich hingegen:

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_u}{\ln(\varepsilon_o/\varepsilon_u)} = \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_o}{\ln(\varepsilon_u/\varepsilon_o)}.$$
(3.11)

Um die verschiedenen Mittelungsmethoden zu bewerten, wurde eine Überprüfung anhand experimentell gewonnener Daten vorgenommen. Dazu wurde die Efficiencykalibrierung für die Sedimentprobe 9.004.075 aus [Wan04] einerseits anhand der Folienmethode vorgenommen, andererseits anhand der für den betreffenden Detektor (Detektor 4) mit der Spiking-Methode erstellten dichteabhängigen Petrischalenkalibrierung. Die Daten für diese Kalibrierung wurden [Wan04] entnommen.

Abb. 3.3 zeigt Kalibrierdaten für alle vier betrachteten Methoden über den gesamten Energiebereich von QCY48. Die vier Datensätze wurden jeweils mit (3.2) gefittet. Dabei steht "Arithmetisches Mittel" für die Mittelung gemäß (3.3), "Geometrisches Mittel" für die Mittelung gemäß (3.10) und "Integrales Mittel" für die Mittelung gemäß (3.11). Abb. 3.4 zeigt in einer Vergrößerung den Bereich kleiner Energien.



Abbildung 3.3: Vergleich von (3.3), (3.10) und (3.11) mit der Spiking-Methode.

Es wird ersichtlich, dass alle vier Methoden innerhalb der Unsicherheiten relativ gut miteinander übereinstimmen. In dieser Arbeit wurde stets ε_m gemäß (3.11) verwendet. Die Unsicherheit von ε_m berechnet sich mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz² und $\epsilon := \varepsilon_u/\varepsilon_o$ zu:

$$u(\varepsilon_m) = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon} - 1 + \ln\epsilon\right)^2 u^2(\varepsilon_u) + (\epsilon - 1 - \ln\epsilon)^2 u^2(\varepsilon_o)}}{(\ln\epsilon)^2},$$
(3.13)

In $u(\varepsilon_o)$ und $u(\varepsilon_u)$ fließen die folgenden Unsicherheiten ein:

- Unsicherheiten der jeweiligen Nettopeakflächen (siehe auch Abschnitt 3.3.2).
- Wägeunsicherheit der pro Flächenstandardpräparat verwendeten Masse an QCY48-Lösung.
- Nuklidspezifische Unsicherheiten wie Tabelle B.4 auf Seite 176 zu entnehmen und die Unsicherheit der Halbwertzeit ([SS98] entnommen).

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)}.$$
(3.12)

²Fehlerfortpflanzungsgesetz: Die kombinierte Standardunsicherheit u(y) des Schätzwertes y einer Größe Y, die in einem funktionalen Zusammenhang $Y = F(X_1, \ldots, X_N)$ zu N nicht korrelierten, von einander unabhängigen Ausgangsmessgrößen X_i mit $1 \le i \le N$ steht, berechnet sich anhand der Standardmessunsicherheiten $u(x_i)$ zu den Schätzwerten x_i wie folgt [MK99]:



Abbildung 3.4: Vergleich von (3.3), (3.10) und (3.11) mit der Spiking-Methode bei kleinen Energien.

3.2.4 Summationskorrektionen

Zum so genannten Summationseffekt kommt es, wenn zwei oder mehrere Gammaquanten innerhalb eines so kurzen Zeitintervalls vom Detektor registriert werden, dass eine zeitliche Auflösung nicht mehr möglich ist. Man erhält dann einen Peak bei der Summe der Energien, anstatt bei den jeweiligen Energien der beteiligten Gammaquanten.

Man unterscheidet zwischen zufälligen und systematischen Summationseffekten. Von einem zufälligen Summationseffekt spricht man bei gleichzeitiger Detektion zweier oder mehrerer aus unterschiedlichen Zerfällen stammender Gammaquanten. Zu systematischen Summationseffekten kommt es bei kaskadenartig verlaufenden Zerfällen, so dass Gammaquanten aus einem Zerfallsprozess gleichzeitig detektiert werden können.

Prinzipiell können Summationseffekte, bezogen auf einen bestimmten Photopeak, sowohl zur Unter- als auch zur Überschätzung der Zählrate führen, sofern kein Korrektionsfaktor eingeführt wird. Ein ausführlicher Beitrag zur Problematik der Wahl des geeigneten Korrektionsfaktors findet sich in [Vah04b]. Dort wird gezeigt, dass die in [DS90] aufgeführten Korrektionsfaktoren eine gute Abschätzung für die auch im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Petrischalengeometrien darstellen. Alle verwendeten Korrektionsfaktoren entstammen daher [DS90].

Die Korrektionsfaktoren k_s beziehen sich stets auf eine bestimmte Linie eines Nuklids. Für ⁴⁰K und ¹³⁷Cs kann jeweils $k_s = 1$ angenommen werden. In Tabelle 2.1 auf Seite 12 finden sich die Korrektionsfaktoren, welche für die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten natürlichen Radionuklide (außer 40 K) anzusetzen sind. Die Korrektionsfaktoren für in der Multinuklidmischung QCY48 enthaltene Radionuklide sind Tabelle B.4 auf Seite 176 zu entnehmen.

Für Korrektionsfaktoren $k_s = 1$ wurde eine Unsicherheit $u(k_s) = 0$ angenommen, für $k_s \neq 1$ eine relative Unsicherheit $u_{rel}(k_s) = u(k_s)/k_s = 0,1$. Dies kann als eher konservative Abschätzung angesehen werden [Vah04b].

3.3 Auswertung von Einzelmessungen

3.3.1 Spezifische Aktivität

Die Aktivität A bzw. die spezifische Aktivität A eines Nuklids in einer Probe wurden folgendermaßen bestimmt:

$$\mathcal{A} = \frac{A}{m} = \left(\frac{N_p}{t_p} - \frac{N_0}{t_0}\right) \cdot \frac{k_s}{m \cdot p_\gamma \cdot \varepsilon},\tag{3.14}$$

mit den bislang noch nicht definierten Formelzeichen:

- N_p : Nettopeakfläche im Probenspektrum
- t_p : Messzeit des Probenspektrums
- N_0 : Nettopeakfläche im Nulleffektspektrum
- t_0 : Messzeit des Nulleffektspektrums
- m : Proben masse.

3.3.2 Messunsicherheit der spezifischen Aktivität

Die Messunsicherheit bei Bestimmung der spezifischen Aktivität einer Linie

Mit (3.12) berechnet sich die Unsicherheit $u(\mathcal{A})$ der spezifischen Aktivität aus (3.14) wie folgt³:

$$u^{2}(\mathcal{A}) = \mathcal{A}^{2} \cdot u^{2}_{\text{rel}}(\tau) + \left(\frac{k_{s}}{m \cdot p_{\gamma} \cdot \varepsilon}\right)^{2} \left[\frac{u^{2}(N_{p})}{t_{p}^{2}} + \frac{u^{2}(N_{0})}{t_{0}^{2}}\right],$$
(3.15)

wobei $u_{\text{rel}}^2(\tau) := u_{\text{rel}}^2(k_s) + u_{\text{rel}}^2(m) + u_{\text{rel}}^2(p_{\gamma}) + u_{\text{rel}}^2(\varepsilon)$ verwendet wurde.

Es sollen an dieser Stelle kurz die einzelnen Beiträge zur Gesamtunsicherheit diskutiert werden:

- Die Unsicherheit des Summationskorrektionskoeffizienten wurde bereits in Abschnitt 3.2.4 diskutiert.
- Die Unsicherheit der Emissionswahrscheinlichkeit wurde wie der Wert der Emissionswahrscheinlichkeit selbst, stets [SS98] entnommen (siehe Abschnitt 2.1.5).

³Die Unsicherheiten der Messzeiten, $u(t_p)$ und $u(t_0)$, wurden dabei vernachlässigt.

3 Experimentelles

- Die Probenmasse wurde als Differenz aus einer Brutto- und einer Taramasse mit einer digitalen Waage bestimmt. Die Waage hat eine Anzeige im Gramm-Bereich, wobei eine Nachkommastelle angegeben wird. Die Unsicherheit bestimmt sich gemäß [MK99] zu $u(m) = \sqrt{2/3} \cdot 0.05$ g.
- Die Unsicherheit der Efficiency eines QCY48-Nuklids wurde bereits errechnet (3.13). In Messungen waren hierbei relative Unsicherheiten von 1–4% typisch. Wegen der sehr guten Interpolationen für $\varepsilon(E_{\gamma})$ mit Werten des quadrierten Korrelationskoeffizienten, dem Bestimmtheitsmaß R^2 , von stets $R^2 > 0.99$ musste nicht mit wesentlich erhöhten Unsicherheiten für interpolierte Efficiency-Werte gerechnet werden. Es konnte daher abdeckend mit $u_{\rm rel}(\varepsilon) = 0.05$ gearbeitet werden.
- Nimmt man für die Zählraten Poisson-Verteilungen an, so ergibt sich für die Unsicherheiten der Nettopeakflächen N:

$$u(N) = \sqrt{N + 2 \cdot N_U},\tag{3.16}$$

wobei N_U für die Anzahl der Zählereignisse im Peakuntergrund steht.

Geringe Beiträge zur Gesamtunsicherheit liefern die Masse (stets unter 1 %) und die Emissionswahrscheinlichkeit (bis wenige Prozent). Die Unsicherheit der Nettopeakfläche im Nulleffekt entfällt bei ¹³⁷Cs und fällt bei ⁴⁰K kaum ins Gewicht (< 1 %). Nur bei geringen Probenbeiträgen zur Zählrate bei Nukliden der natürlichen Zerfallsreihen kann $u(N_0)$ einen Beitrag von einigen Prozent liefern. Dominierend mit Beiträgen von fast 100 % zur Gesamtunsicherheit ist in der Regel die Unsicherheit der Efficiency. Dies gilt, bis auf wenige Ausnahmen, insbesondere für ¹³⁷Cs und ⁴⁰K. Eine Erhöhung der Messdauer würde dann keine geringere Gesamtunsicherheit mehr liefern. Nur bei geringen Aktivitäten natürlicher Radionuklide liefert $u(N_P)$ den höchsten Beitrag zur Gesamtunsicherheit. Dann sind möglichst lange Messzeiten erstrebenswert, um die Gesamtunsicherheit zu senken. Falls Summationskorrektionen zu berücksichtigen sind, ist in der Regel $u(k_s)$ dominierend.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen konnten für $^{137}\rm{Cs}$ und $^{40}\rm{K}$ in den meisten Fällen relative Gesamtmessunsicherheiten der spezifischen Aktivität von weniger als 10 % erreicht werden.

Berechnung der spezifischen Aktivität aus mehreren Linien

Wird die spezifische Aktivität \mathcal{A} eines Nuklids aus spezifischen Aktivitäten \mathcal{A}_i anderer Nuklide bestimmt (siehe Abschnitt 2.1.2), so nimmt man für \mathcal{A} den gewichteten arithmetischen Mittelwert $\overline{\mathcal{A}} = (\sum_i w_i \mathcal{A}_i) / \sum_i w_i$ an [Wan04] [Sac04], wobei in diesem Fall die Gewichte w_i über die Unsicherheiten $u(\mathcal{A}_i)$ bestimmt werden: $w_i = 1/u^2(\mathcal{A}_i)$. Damit ergibt sich:

$$\bar{\mathcal{A}} = \frac{\sum_{i} \mathcal{A}_{i}/u^{2}(\mathcal{A}_{i})}{\sum_{i} 1/u^{2}(\mathcal{A}_{i})}.$$
(3.17)

Die Unsicherheit $u(\bar{\mathcal{A}})$ berechnet sich dann aus (3.12) zu:

$$u(\bar{\mathcal{A}}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i} 1/u^2(\mathcal{A}_i)}}.$$
(3.18)

3.3.3 Erkennungs-, Nachweis- und Vertrauensgrenzen

Die in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 als Messergebnis bestimmte spezifische Aktivität \mathcal{A} mit ihrer Unsicherheit $u(\mathcal{A})$ ist ein so genanntes primäres Messergebnis x und stellt zusammen mit der primären Messunsicherheit u(x) (hier: $u(\mathcal{A})$) das vollständige primäre Messergebnis für die Messgröße dar [DIN96]. Zur Beurteilung des Messergebnisses ist die Bestimmung der charakteristischen Grenzen notwendig [MK99], wobei der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Ansatz gemäß [DIN03] auf Verfahren der Bayes-Statistik beruht.

Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze x^* erlaubt eine Entscheidung darüber, ob der durch die Messgröße xquantifizierte physikalische Effekt vorliegt, d. h. in diesem Fall, ob tatsächlich ein Probenbeitrag unter den gemessenen Kernstrahlungsereignissen zu verzeichnen ist. Gilt $x > x^*$ wird angenommen, dass dem so ist, d. h. die Nullhypothese $H_0: \eta = 0$ für den wahren Wert η der Messgröße wird verworfen. Andernfalls wird H_0 beibehalten. Dabei wurde als Wahrscheinlichkeit α des Fehlers erster Art im Rahmen dieser Arbeit gemäß [DIN03] $\alpha = 0.05$ gewählt.

Die Erkennungsgrenze ist wie folgt definiert:

$$x^* := k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0). \tag{3.19}$$

Dabei ist $k_{1-\alpha}$ das Quantil der Standardnormalverteilung zur Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$, d. h. mit $\alpha = 0.05$ gilt $k_{1-\alpha} = 1.645$. Desweiteren ist $\tilde{u}(0) = \tilde{u}(\eta = 0)$ und $\tilde{u}(\eta)$ die Unsicherheit als Funktion des wahren Wertes η .

Nachweisgrenze

Mit Hilfe der Nachweisgrenze η^* kann entschieden werden, ob das Messverfahren für den Messzweck geeignet ist, indem sie mit einem vorgegebenen Richtwert für das Messverfahren verglichen wird.

Die Nachweisgrenze ist der kleinste wahre Wert der Messgröße, der mit dem verwendeten Messverfahren noch zuverlässig nachgewiesen werden kann und für den bei Anwendung der im Abschnitt über die Erkennungsgrenze eingeführten Entscheidungsregel die Wahrscheinlichkeit des Fehlers zweiter Art gleich einem zu wählenden Wert β ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde gemäß [DIN03] stets $\beta = \alpha = 0.05$ gewählt.

Die Nachweisgrenze, für die $\eta^* \geq x^*$ gilt, wird implizit über

$$\eta^* := x^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(\eta^*) \tag{3.20}$$

definiert. Diese Gleichung ist nicht transzendent, kann aber am einfachsten durch eine Iteration mit $\eta^* \approx 2x^*$ als Anfangsnäherung berechnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit erwiesen sich 15 Iterationsschritte stets als ausreichend. Konvergiert die Iteration nicht, so besitzt (3.20) keine Lösung und das Messverfahren ist für den Messzweck hinsichtlich der Anforderungen nicht geeignet. Dies gilt auch für eine Lösung $\eta^* < x^*$.

3 Experimentelles

Vertrauensgrenzen

Der Vertrauensbereich zu einem mit Hilfe der Erkennungsgrenze erkannten physikalischen Effekt wird durch die *Vertrauensgrenzen* so begrenzt, dass er den wahren Wert der Messgröße mit einer zu wählenden Wahrscheinlichkeit $1 - \gamma$ enthält. Im Rahmen dieser Arbeit wurde gemäß [DIN03] stets $\gamma = 0.05$ gewählt. Die untere Vertrauensgrenze η_l und die obere Vertrauensgrenze η_u sind dabei wie folgt definiert:

$$\eta_l := x - k_p \cdot u(y),$$

$$\eta_u := x + k_q \cdot u(y).$$

Dabei sind:

$$p := \sigma \cdot (1 - \gamma/2),$$

$$q := 1 - \sigma \cdot \gamma/2,$$

$$\sigma := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x/u(x)} d\omega \, e^{-\omega^2/2} = \Phi\left(\frac{x}{u(x)}\right).$$
(3.21)

 $\Phi(t)$ ist die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung und somit die Umkehrfunktion von $k_p = k_p(p)$. Ihre Funktionswerte können über (3.21) berechnet oder Tabellen entnommen werden (siehe z. B. [MK99] oder [Fah04]).

Bester Schätzwert

Gilt $x > x^*$, ist also der durch die Messgröße beschriebene physikalische Effekt als erkannt anzusehen, so ist der *beste Schätzwert* ζ der Messgröße zu berechnen:

$$\zeta := x + \frac{u(x) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2u^2(x)}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}.$$

Die zugehörige Standardunsicherheit⁴ ist $u(\zeta) = \sqrt{u^2(x) - (\zeta - x)\zeta}$.

Erkennungs- und Nachweisgrenzen der Gammaspektrometrie

Um die Erkennungs- und Nachweisgrenze für ein konkretes Modell der Auswertung zu berechnen, ist gemäß (3.19) und (3.20) die Standardunsicherheit $\tilde{u}(\eta)$ zu berechnen. Dazu ist zunächst x durch η zu ersetzen [DIN03]. Für das vorliegende Auswertungsmodell (3.14) gilt dann mit der Abkürzung $\tau := k_s/(m \cdot p_{\gamma} \cdot \varepsilon)$:

$$\eta = x = \mathcal{A} = \tau \cdot \left(\frac{N_p}{t_p} - \frac{N_0}{t_0}\right),\tag{3.22}$$

⁴Aus Gründen der Einfachheit wurde bei der Berechnung der Standardunsicherheit des besten Schätzers zu einem zerfallskorrigierten Messergebnis der spezifischen Aktivität auf die Berücksichtigung der Unsicherheit der Halbwertzeit verzichtet. Dafür wurde das Produkt aus Zerfallskorrekturfaktor und eigentlichem primären Messergebnis als Messergebnis x angesehen. Diese Vorgehensweise ist legitim, da sie die Standardunsicherheit des besten Schätzers nicht in relevanten Größenordnungen verändert.

3.3 Auswertung von Einzelmessungen

und mit (3.15) und (3.16):

$$\tilde{u}^{2}(\eta) = \eta^{2} \cdot u_{\rm rel}^{2}(\tau) + \tau^{2} \left(\frac{N_{p} + 2N_{p,U}}{t_{p}^{2}} + \frac{N_{0} + 2N_{0,U}}{t_{0}^{2}} \right).$$
(3.23)

Umformen und Einsetzen von (3.22) in (3.23) liefert:

$$\tilde{u}^{2}(\eta) = \eta^{2} \cdot u_{\text{rel}}^{2}(\tau) + \tau^{2} \left(\frac{1}{t_{p}} \cdot \left(\frac{\eta}{\tau} + \frac{N_{0}}{t_{0}} \right) + \frac{2N_{p,U}}{t_{p}^{2}} + \frac{N_{0} + 2N_{0,U}}{t_{0}^{2}} \right).$$

Für die Erkennungsgrenze folgt dann aus (3.19):

$$x^* = k_{1-\alpha} \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{N_0}{t_p \cdot t_0} + \frac{2N_{p,U}}{t_p^2} + \frac{N_0 + 2N_{0,U}}{t_0^2}}.$$
(3.24)

Die Nachweisgrenze berechnet sich anhand von (3.20) zu

$$\eta^* = x^* + k_{1-\beta} \cdot \sqrt{\eta^{*2} \cdot u_{\text{rel}}^2(\tau) + \tau^2 \left(\frac{1}{t_p} \cdot \left(\frac{\eta^*}{\tau} + \frac{N_0}{t_0}\right) + \frac{2N_{p,U}}{t_p^2} + \frac{N_0 + 2N_{0,U}}{t_0^2}\right)}.$$
 (3.25)

Liegt kein Nulleffekt vor, so ist in (3.24) und (3.25) $N_0 = N_{0,U} = 0$ zu setzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur solche Messwerte in spätere Auswertungen einbezogen, bei denen das primäre Messergebnis die Nachweisgrenze überschreitet. Bei den untersuchten Proben war dies in Bezug auf ¹³⁷Cs und ⁴⁰K fast immer der Fall.

Tabelle 3.2 zeigt eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen arithmetischen Mittelwerte der Erkennungs- und Nachweisgrenzen. Die Datensätze enthalten dabei zum Teil auch Messwerte, die im Rahmen von [Kal03] erzielt wurden. Für das Probenmaterial Milch sind sowohl der gesamte Datensatz aufgelistet (mit (G) gekennzeichnet), als auch die Teildatensätze, die ausschließlich auf Messungen beruhen, die im Rahmen dieser Arbeit (mit (2) gekennzeichnet) bzw. von [Kal03] (mit (1) gekennzeichnet) durchgeführt wurden. Dabei zeigt sich, dass in dieser Arbeit geringere Erkennungs- und Nachweisgrenzen erzielt werden konnten. Dies ist auf längere Messzeiten zurückzuführen.

		$^{137}\mathrm{Cs}$		$^{40}\mathrm{K}$	
Probenmaterial	Massenbezug	x^*	η	x^*	η
Fleisch (G)	Aschmasse	2,5	5,2	19,1	$39,\!6$
Fleisch (G)	Trockenmasse	2,2	4,5	$18,\! 0$	37,7
Fisch $(G,1)$	Aschmasse	5,2	$10,\!6$	71,0	$144,\!1$
Milch (G)	Trockenmasse	1,7	3,6	20,1	$42,\!4$
Milch (2)	Trockenmasse	1,6	3,2	$14,\! 6$	30,7
Milch (1)	Trockenmasse	$1,\!9$	4,0	$25,\!8$	$54,\!5$
Käse $(G,2)$	Trockenmasse	1,6	3,4	17,7	$37,\!3$
Heu (G)/Gras (G)	Trockenmasse	2,4	5,1	$27,\!5$	$58,\!0$
Getreide (G)	Trockenmasse	$1,\!0$	2,0	13,7	$29,\!0$
Gemüse (G)	Trockenmasse	$1,\!8$	3,7	22,7	$47,\!8$
Beeren (G)	Trockenmasse	6,1	$12,\!4$	14,2	$_{30,2}$
OA u. Beeren (G)	Trockenmasse	$11,\!8$	$24,\! 0$	$36,\!8$	76,7
Pilze (G)	Trockenmasse	22,0	$44,\!5$	$33,\!9$	$71,\!3$
OA u. Pilze (G)	Trockenmasse	7,0	14,2	16,7	$34,\!6$
Boden (G)	Trockenmasse	1,2	2,4	5,3	$11,\!1$

Tabelle 3.2: Arithmetische Mittelwerte der Erkennungsgrenzen (x^*) und Nachweisgrenzen (η) für verschiedene Probenmaterialien. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

Bei mit (G) gekennzeichneten Datensätzen handelt

es sich um einen gesamten Datensatz.

Mit (1) gekennzeichnete Datensätze beinhalten ausschließlich im Rahmen von [Kal03] erhaltene Messwerte.

Mit (2) gekennzeichnete Datensätze beinhalten ausschließlich im Rahmen dieser Arbeit erhaltene Messwerte.

OA: Organische Auflage

3.4 Statistische Auswerteverfahren

3.4.1 Normalverteilung und logarithmische Normalverteilung

In diesem Abschnitt sollen die in den folgenden Kapiteln an konkreten Fällen diskutierten Verteilungen definiert werden.

Eine Zufallsgröße X heißt normalverteilt mit den Parametern $\mu \in \mathbb{R}$ und $\sigma^2 > 0$, wenn sie die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \in \mathbb{R},$$
(3.26)

besitzt. Als Schreibweise wird häufig $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ verwendet. Die Parameter μ und σ^2 sind genau Erwartungswert und Varianz von X.

Von einer logarithmischen Normalverteilung (kurz: Lognormalverteilung) mit den Parametern μ und σ^2 einer nichtnegativen Zufallsvariablen Y spricht man, wenn $\ln(Y) \sim N(\mu, \sigma^2)$ gilt. Als Schreibweise wird entsprechend $Y \sim LN(\mu, \sigma^2)$ verwendet. Für die Dichtefunktion der Lognormalverteilung gilt:

$$f(y) = \begin{cases} \left(\sqrt{2\pi\sigma y}\right)^{-1} \cdot \exp\left(-(\ln y - \mu)^2/(2\sigma^2)\right) & \text{für } y > 0\\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Für den Erwartungswert gilt damit:

$$E(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} dy \ y \cdot f(y) = e^{\mu + \sigma^2/2}.$$

Wurden n Messungen der Größe Y durchgeführt, so kann mit

$$E_n(Y) = e^{\mu_n + \sigma_n^2/2} \tag{3.27}$$

ein Schätzwert für E(Y) berechnet werden. Bezeichnen x_1, \ldots, x_n die aus den Messungen erhaltenen Werte der Größe X, so gilt dabei

$$\mu_n = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$
 und $\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu_n)^2}{n - 1}.$

Kommt eine Messwertverteilung bei wiederholten Messungen einer Messgröße nur durch zufällig verteilte Messabweichungen zustande und existiert ein wohldefinierter wahrer Wert der Messgröße, so kann die Messwertverteilung durch eine Normalverteilung beschrieben werden [MK99].

Auch Lognormalverteilungen treten in der Natur oft auf [Lim01]. Denn wird eine Messgrösse zu einem Satz von Proben von multiplikativ auf die Messgrösse einwirkenden Prozessen mit normalverteilten Parametern beeinflusst, so ist als Folge des multiplikativen Grenzwertsatzes der Statistik eine Lognormalverteilung zu beobachten [MK99].

3.4.2 Statistische Tests

Um einen Satz an Messwerten auf bestimmte Verteilungen zu testen, bieten sich verschiedene Verfahren an, von denen in dieser Arbeit zwei verwendet wurden: der Shapiro-Wilk-Test und so genannte Quantil-Quantil-Plots (QQ-Plots). Dieses Verteilungstests sind von Bedeutung, da im späteren Verlauf der Arbeit (siehe Kapitel 5 und 6) Annahmen über Verteilungen bestimmter Größen für Monte-Carlo-Simulationen getroffen werden müssen.

Zur Untersuchung, ob sich die Mittelwerte zweier normalverteilter Datensätze signifikant unterscheiden, wurde der t-Test gemäß [Fah04] eingesetzt.

Shapiro-Wilk-Test

Der Shapiro-Wilk-Test nach [Roy82] wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe einer in der Software ORIGIN 7.5 gemäß [NAG02] implementierten Routine ausgeführt. Als Input verlangt die Routine eine Wertemenge $\{x_1, \ldots, x_n\}$ mit $3 \le n \le 2000$ und berechnet eine so genannte W-Statistik:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

wobei es sich bei den a_i um Gewichte handelt, deren Werte nur von n abhängen. Bei \bar{x} handelt es sich um den arithmetischen Mittelwert der x_i . Der Algorithmus berechnet dann einen p-Wert, d. h. die Wahrscheinlichkeit unter der Nullhypothese, dass der eingegebene Datensatz normalverteilt ist, den errechneten Prüfgrößenwert W oder einen in Richtung der Alternativhypothese extremeren Wert zu erhalten. Die Nullhypothese wird verworfen, wenn $p \leq \alpha$ ist, wobei in dieser Arbeit im Rahmen des Shapiro-Wilk-Tests für das Signifikanzniveau α , die Wahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art, stets $\alpha = 0,05$ gewählt wurde. Ist $p > \alpha$, kann die Annahme einer Normalverteilung des Datensatzes nicht abgelehnt werden. Verwendet man $\{\ln x_1, \ldots, \ln x_n\}$ als Eingabemenge, kann man die Hypothese einer Lognormalverteilung des Datensatzes $\{x_1, \ldots, x_n\}$ überprüfen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass, trotz der Angabe $n \ge 3$, dieser Test, wie auch die QQ-Plots, nur bedingt aussagekräftige Ergebnisse für wenig umfangreiche Datensätze liefert.

Quantil-Quantil-Plots

QQ-Plots bieten die Möglichkeit einen Datensatz mit einer Testverteilung bereits mit Hilfe des Augenscheins zu vergleichen. Hierzu trägt man in ein Diagramm die Quantile des zu testenden Datensatzes gegen die Quantile der gewählten Verteilung auf. Dazu werden die Werte des Datensatzes geordnet: $(y_{(1)}, \ldots, y_{(i)}, \ldots, y_{(n)})$. $y_{(i)}$ wird dann als i/n-Quantil aufgefasst. Trägt man nun die Quantile der Testverteilung als $z_{(i)}$ auf der Abszisse auf und die $y_{(i)}$ auf der Ordinate, so liegen die Punkte $(z_{(i)}, y_{(i)})$ für den Idealfall, dass der Datensatz der Testverteilung entspricht, auf der Geraden y = z. Mögliche systematische Abweichungen von der Testverteilung sind sofort sichtbar und können oft auch eingestuft werden, da sich Eigenschaften einer Verteilung, wie z. B. eine bestimmte Schiefe oder Krümmung, zum Teil erkennen lassen. Ein konvexes Erscheinungsbild des QQ-Plots deutet beispielsweise auf eine linkssteile Verteilung hin. Entsprechend ist ein konkaver Plot ein Hinweis auf eine rechtssteile Verteilung. "Schlangenlinien" um die Winkelhalbierende legen hingegen eher die Vermutung einer multimodalen Verteilung nahe. Ein Anzeichen für im Datensatz enthaltene Ausreißer liegt vor, wenn fast alle Punkte im QQ-Plot auf oder bei der Winkelhalbierenden liegen und die wenigen übrigen Punkte deutlich davon abweichen.

Ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass die Annahme der Übereinstimmung mit der Testverteilung abgelehnt werden kann, ist die Güte der linearen Regression. Für $R^2 \ge 0.95$ wird diese in der Regel als gut bezeichnet und die Annahme nicht abgelehnt.

Die QQ-Plots wurden im Rahmen dieser Arbeit mit der Software SPSS (Versionen 11.5 und 12.0) erstellt. Als Testverteilung wurde stets eine Normalverteilung gewählt. Um den Datensatz mit einer Lognormalverteilung zu vergleichen, verfährt man wie bereits beim Shapiro-Wilk-Test beschrieben und verwendet den logarithmierten Datensatz als Eingabe. Die Achsenbeschriftungen der QQ-Plots sind daher stets als natürliche Logarithmen der spezifischen Aktivitäten (Kapitel 4) bzw. Transferfaktoren (Kapitel 5) zu verstehen.

Ein Beispiel für einen QQ-Plot zeigt Abb. 3.5. Dort gilt für den Datensatz der auf die Trockenmasse bezogenen ¹³⁷Cs-Gehalte in Grasproben $R^2 = 0.97$, so dass die Annahme der Übereinstimmung mit einer Lognormalverteilung nicht abgelehnt werden kann.



Abbildung 3.5: QQ-Plot für ¹³⁷Cs-Gehalte in Gras (bezogen auf die Trockenmasse). Die schwarze Gerade ist die Winkelhalbierende, die rote der lineare Fit.

$t\text{-}\mathsf{Test}$

Die "Ein-Stichproben-Version" des t-Tests vergleicht einen hypothetischen Erwartungswert μ_0 mit dem tatsächlichen, unbekannten Erwartungswert $\mu := E(X)$, wobei X die betrachtete Zufallsvariable mit n unabhängigen Wiederholungen $\{X_1, \ldots, X_n\}$ ist. Eine Normalverteilung $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ist anzunehmen. Man kann nun ein Hypothesenpaar mit Nullhypothese H_0 und Alternativhypothese H_1 ansetzen:

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad H_1: \mu \neq \mu_0, \tag{3.28}$$

und verwendet die Teststatistik

$$T_X := \frac{\bar{X} - \mu_0}{S} \sqrt{n},\tag{3.29}$$

wobe
i $S=\sqrt{S^2}$ die Standardabweichung zur Stichprobenvarian
z S^2 ist. Für $\mu=\mu_0$ besitzt T_X eine so genannte
 t-Verteilung mit n-1 Freiheitsgraden:
 t(n-1). Die Werte dieser Verteilung sind tabelliert.
 H_0 wird nun abgelehnt, wenn

$$|T_X| > t_{1-\alpha/2}(n-1), \tag{3.30}$$

wobei α das vorgegebene Signifikanzniveau und $t_{1-\alpha/2}(n-1)$ das $(1-\alpha/2)$ -Quantil der t(n-1)-Verteilung ist.

3.5 Qualitätssicherung

3.5.1 Sorgfalt in der Probenaufbereitung

Bei der Aufbereitung einer großen Anzahl von Proben, von denen zu erwarten ist, dass die enthaltene und zu messende ¹³⁷Cs-Aktivität über mehrere Größenordnungen schwankt, ist sicherzustellen, dass Kontaminationen der Proben untereinander ausgeschlossen sind. Dazu wurden die Proben mit Hilfe eines Kontaminationsmonitors und anhand der ukrainischen Messergebnisse in drei Stufen unterschiedlicher Kontamination unterteilt. Die Aufbereitung erfolgte von der Stufe niedriger Kontamination hin zur höchsten Kontamination. Zudem fand die Aufbereitung der am höchsten kontaminierten Proben nicht im selben Laborraum statt, wie die der Proben vergleichsweise niedriger und mittlerer Kontamination. Sämtliches zur Aufbereitung einer Probe verwendetes Material (d. h. Geräte wie Küchenmaschinen, Glas-, Plastik- und Porzellanschalen, diverses Besteck wie Messer oder Spachtel usw.) wurde nach dem Kontakt mit einer Probe gründlich gereinigt und, sobald sich an Behältnissen Abnutzungsspuren wie Rauigkeit zeigten, die ein dauerhaftes Anhaften von Probenmaterial ermöglicht hätten, gegen noch unbenutztes ersetzt.

Bereits mit dem Probenmaterial gefüllte und verklebte Petrischalen wurden nach dem Trocknen des Klebstoffs in PE-Folie eingeschweisst, um eine Kontamination der Detektoren durch evtl. an der Außenseite der Petrischale anhaftendes oder durch mögliche undichte Stellen der verklebten Petrischale austretendes Material zu verhindern.

3.5.2 Nulleffekt

Um möglicherweise über längere Zeit unentdeckt bleibende Verunreinigungen der verwendeten Detektoren insbesondere mit ¹³⁷Cs ausschließen zu können, wurden auf allen Detektoren mehrmals Nulleffektmessungen durchgeführt. Außerdem kann so die zeitliche Konstanz des Nulleffekts für natürliche Radionuklide überprüft werden, um diesbezügliche Unsicherheiten bei der Aktivitätsbestimmung gegebenenfalls auszuschließen. Wie Abb. 3.6 zeigt, kann von der Konstanz des Nulleffekts für ⁴⁰K ausgegangen werden. Anders stellt es sich für die ebenfalls in Abb. 3.6 eingetragene Nulleffektzählrate der 609,3 keV-Linie des ²¹⁴Bi dar. ²¹⁴Bi ist, wie bereits erwähnt, ein Radionuklid der Uran-Radium-Zerfallsreihe und die dritte Tochter des ²²²Rn. Es ist anzunehmen, dass das Verhalten des Edelgases Radon in der Umgebungsluft des Detektors diese Variabilität der Nulleffektzählrate des ²¹⁴Bi um etwa einen Faktor 2 bewirkt. Inwiefern dies eine Unsicherheit für Messungen niedriger Aktivitäten von Nukliden wie ²¹⁴Bi oder ²¹⁴Pb darstellt, soll an dieser Stelle jedoch nicht diskutiert werden, zumal es für die Messung von Bodenproben (siehe Abschnitt 4.2) vermutlich von geringer Bedeutung ist und das Hauptaugenmerk auf ¹³⁷Cs und ⁴⁰K lag.

Ein ¹³⁷Cs-Beitrag konnte bei keiner der Nulleffektmessungen festgestellt werden, so dass eine Kontamination der Detektoren mit diesem Nuklid ausgeschlossen werden kann.



Abbildung 3.6: Zählrate des Nulleffektes für $^{40}{\rm K}$ und die 609,3 keV-Linie des $^{214}{\rm Bi}$ auf Detektor 1.

3.5.3 Ringvergleich V/98

Zur allgemeinen Qualitätssicherung wurde eine Ringversuchsprobe vermessen. Bei der Probe mit dem Code BfS/ST2.3/Boden/V-98 handelt es sich um eine Bodenprobe vom Flussufer der Mulde in der Nähe der Erzverladestelle Schacht 371 der Wismut GmbH, Sanierungsbetrieb Aue [Sch98]. Entsprechende Teile der bereits im Vorfeld des Ringversuchs getrockneten, zerkleinerten und homogenisierten Probe wurden für diese Arbeit in die Geometrien P5 und P10 gepresst. Die Petrischalen wurden gasdicht verklebt und nach mindestens drei Wochen auf den verwendeten Detektoren vermessen. Die Äquilibrierung war bei dieser Probe sinnvoll, da sie die Möglichkeit bietet, auch Messwerte von Radonfolgeprodukten mit den in [Sch98] angegebenen Werten zu vergleichen, und sich nicht nur auf beispielsweise ¹³⁷Cs und ⁴⁰K zu beschränken (siehe Abschnitt 2.1.2). Anhand dieses Ringversuchs war es möglich, alle für die Messung ukrainischer Proben eingesetzten Detektor-Flächenstandardpräparat-Kombinationen auf ihre prinzipielle Funktionstüchtigkeit hin zu überprüfen. Für einen Überblick über alle vorgenommen Messungen an dieser Ringvergleichsprobe siehe Tabellen B.5–B.9 (ab Seite 177).

Insgesamt zeigt sich bei allen Radionukliden bis auf ¹³⁷Cs im Rahmen der Messunsicherheiten eine recht gute Übereinstimmung mit den Vergleichswerten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und dem Gesamtmittelwert des Ringvergleichs. Für ⁴⁰K verdeutlicht dies Abb. 3.7.

Für 137 Cs sind hingegen für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen in Bezug auf die Vergleichswerte Abweichungen hin zu geringeren spezifischen Aktivitäten



Abbildung 3.7: Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Messwerte (mit Angabe des jeweiligen Detektors und des verwendeten Flächenstandardpräparates) für ⁴⁰K in der Ringvergleichsprobe mit dem Vergleichswert der PTB (,PTB') und dem Gesamtmittelwert aller Teilnehmer des Ringvergleichs (,Vergleich').

festzustellen. Messungen in [Har04], [Hoh04b] und [Wan04] an derselben Probe ergaben vergleichbare Abweichungen. Dabei wurden zum Teil auch andere Methoden der Efficiency-Kalibrierung eingesetzt als in dieser Arbeit. In [Vah04b] und [Kal03] hingegen, wo ebenfalls dieselbe Probe untersucht wurde, werden Messwerte für die ¹³⁷Cs-Aktivität genannt, die eher dem Vergleichswert der PTB entsprechen. Dies ist vermutlich dadurch erklärbar, dass der ¹³⁷Cs-Peak bei dieser Probe durch ein Nuklid ähnlicher, aber leicht höherer Energie gestört wird, wie Abb. 3.8 zeigt.⁵

Je nach der Energieauflösung des verwendeten Detektors lässt sich der Störpeak nicht ohne weiteres von dem eigentlich interessierenden ¹³⁷Cs-Peak unterscheiden, wie Abb. 3.9 zeigt. Wie anhand der für diese Arbeit vorliegenden Messdateien zu [Kal03] nachvollzogen werden konnte, wurde dort tatsächlich der störende Peak als ¹³⁷Cs-Beitrag gewertet, was in der höheren Aktivität im Vergleich zu den Messungen dieser Arbeit resultiert.

Abschließend lässt sich somit festhalten, dass die gemessene ¹³⁷Cs-Aktivität zwar nicht dem Vergleichswert der PTB entspricht, aber den Ergebnissen vorangegangener Messungen an derselben Probe.

 $^{{}^{5}}$ Ein ähnlicher Störpe
ak wurde bei den untersuchten Proben aus der Ukraine **nicht** be
obachtet.



Abbildung 3.8: $^{137}\mathrm{Cs}\text{-Peak}$ im Spektrum der Ringvergleichsprobe nach Messung mit Detektor 3.



Abbildung 3.9: $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Peak}$ im Spektrum der Ringvergleichsprobe nach Messung mit Detektor 1.
3.5.4 Kaliumchlorid als Referenzmaterial

Eine weitere qualitätssichernde Maßnahme, die sich nur auf das Nuklid ⁴⁰K bezieht, ist die Anfertigung eines eigenen Kaliumstandards. Dazu wurde pulverförmiges Kaliumchlorid⁶ KCl in Petrischalen P10 und P5 gepresst.

Die spezifische ⁴⁰K-Aktivität \mathcal{A}_{KCl} des verwendeten Kaliumchlorids berechnet sich aus der ⁴⁰K-Aktivität \mathcal{A}_{KCl} gemäß $\mathcal{A}_{\text{KCl}} = \lambda N_{\text{KCl}}$ über

$$\mathcal{A}_{\mathrm{KCl}} = \ln 2 \cdot \frac{N_A \alpha \nu}{M T_{1/2}},$$

wobei M das Molgewicht des KCl-Pulvers, N_A die Avogadro-Konstante, $T_{1/2}$ die Halbwertzeit von ⁴⁰K, α den tatsächlichen KCl-Anteil im Pulver und ν den Anteil des Isotops ⁴⁰K im natürlich vorkommenden Kalium bezeichnet:

$$M = 74,55 \text{ g mol}^{-1} \text{ [Dem96]}$$

$$N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \text{ [COD02]}$$

$$T_{1/2} = 4,66 \cdot 10^{11} \text{ d} \text{ [SS98]}$$

$$\alpha = 0,995 \quad (\text{gemä\& Herstellerangabe})$$

$$\nu = 0,000117 \quad [\text{Kem96]}.$$

So errechnet man:

$$\mathcal{A}_{\rm KCl} = 16190 \,\rm Bq \, kg^{-1}. \tag{3.31}$$

Die Unsicherheiten von M, N_A , α und ν sollen an dieser Stelle ausser Acht gelassen werden, aber anhand der in [SS98] angegebenen Standardunsicherheit $u(T_{1/2}) = 0.03 \cdot 10^{11} \text{ d von}$ $T_{1/2}$ kann eine untere Schranke für die Unsicherheit $u(\mathcal{A}_{\text{KCl}})$ von \mathcal{A}_{KCl} errechnet werden:

$$u(\mathcal{A}_{\text{KCl}}) > \ln 2 \cdot \frac{N_A \alpha \nu}{M T_{1/2}^2} \cdot u(T_{1/2}) = 104 \,\text{Bq kg}^{-1}.$$
 (3.32)

Wie Abb. 3.10 verdeutlicht, zeigt sich für alle Messungen innerhalb der Unsicherheiten eine Übereinstimmung mit dem berechneten Wert (3.31).

3.5.5 Güte aliquoter Teile

Da insbesondere bei den Bodenproben in der Regel mehr Material vorhanden war als für die Messung in Petrischalen benötigt wurde, wurde für acht Bodenproben überprüft, ob die Messwerte von zwei voneinander verschiedenen Teilmengen M_1 , M_2 der Ausgangsprobe, die jeweils in eine Petrischale gepresst wurden, übereinstimmen. Wie Tabelle B.10 auf Seite 178 zu entnehmen ist, kann innerhalb der Messunsicherheiten von einer Übereinstimmung der Messwerte für M_1 und M_2 bei allen betrachteten Proben gesprochen werden.

⁶Hersteller: Merck KGaA, Darmstadt. Katalog-Nr. 104936



Abbildung 3.10: Berechnete und mit diversen Detektoren und Flächenstandardpräparaten gemessene ⁴⁰K-Aktivität in Kaliumchlorid. Für den berechneten Wert ist die untere Schranke für die Unsicherheit gemäß (3.32) eingezeichnet.

3.5.6 Einfluss der Korngröße bei Bodenproben

Aufgrund der Anzahl vorhandener Bodenproben und dem damit verbundenen zeitlichen Aufwand bei der Aufbereitung derselben, wurden die Bodenproben für diese Arbeit mit einem Sieb der Maschenweite 2 mm gesiebt. In anderen Arbeiten erfolgte die Siebung teilweise mit geringeren Maschenweiten (z. B. 1 mm in [Hoh04b] und 0,2 mm in [Wan04]). Um sicherzustellen, dass bei der Messung von Bodenproben in Petrischalen keine zu großen Effekte durch evtl. uneinheitliche Schüttdichten unbemerkt bleiben, wurden von zehn Bodenproben Teilmengen mit den Korngrößen < 2 mm und < 0,5 mm erzeugt. Zunächst erfolgte dazu eine Siebung mit der Maschenweite 2 mm der gesamten, bereits gemahlenen Probe und eine anschließende Homogenisierung. Nach der Entnahme und dem Pressen einer Teilmenge ,Grob' in eine Petrischale, wurde der verbliebene Rest mit einem Sieb der Maschenweite 0,5 mm gesiebt, erneut homogenisiert und ebenfalls in eine Petrischale gepresst (Teilmenge ,Fein').

Wie Tabelle B.11 auf Seite 179 zeigt, stimmen die Messwerte für die beiden unterschiedlichen Methoden der Aufbereitung innerhalb der Unsicherheiten recht gut überein.

3.5.7 Laborinterne Vergleiche

Bodenproben

Aus zeitlichen Gründen konnte nicht der komplette Satz an Bodenproben im Rahmen dieser Arbeit vermessen werden. Der Teil der Bodenproben mit einer Probennummer bis 321 war bereits in die Auswertungen in [Kal03] eingeflossen, wurde allerdings auch nicht im Rahmen jener Arbeit vermessen, sondern in der zweiten Hälfte 2002 und der ersten Hälfte 2003 durch einen anderen Mitarbeiter des ZSR.

Die Trocknung jener Böden erfolgte in dem selben Trockenschrank, der auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, allerdings bei einer Temperatur von 80 °C. Eine stichprobenartige Nachtrocknung bei 105 °C einzelner Proben ergab jedoch keinen bedeutenden weiteren Massenverlust, so dass von einer erfolgten vollständigen Trocknung ausgegangen werden kann.

Im Anschluss an die Trocknung wurde das Probenmaterial mit Hilfe eines Mörsers zerdrückt. Eine maschinelle Zerkleinerung oder Homogenisierung und eine Siebung erfolgten nicht. Für die Messung fanden 11 PE-Flaschen Verwendung. Zur Efficiency-Kalbrierung wurden Proben geringer, mittlerer und hoher Füllhöhe mit QCY48-Standardlösung versetzt und automatisch über mehrere Tage vermischt. Evtl. Dichteunterschiede blieben bei dieser Kalibrierung unberücksichtigt, da von einer näherungsweise einheitlichen Dichte der Proben ausgegangen wurde. Im Rahmen der Auswertung unterblieben die Bestimmung der charakteristischen Grenzen und Messunsicherheiten, wie auch qualitätssichernde Maßnahmen in Bezug auf die Efficiency-Kalibrierung wie beispielsweise die Vermessung einer Ringvergleichsprobe.

Aus den genannten Gründen sollten jene Ergebnisse mit im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen verglichen werden. Zunächst musste dazu die Auswertung und insbesondere die Efficiency-Kalibrierung in Abhängigkeit von der Füllhöhe für die ursprünglichen Messungen erneut vorgenommen werden, um einige offensichtliche Rechen- und Übertragungsfehler zu korrigieren. Die Unsicherheiten insbesondere in Bezug auf die Efficiency-Kalibrierung ließen sich nicht mehr nachvollziehen und wurden daher geschätzt. Die verwendeten Werte entsprechen somit nicht den in [Kal03] zitierten Werten.

Einige der betreffenden Bodenproben wurden nun im Rahmen dieser Arbeit erneut aufbereitet und vermessen. Dabei wurde das gleiche Verfahren wie für die übrigen in dieser Arbeit untersuchten Bodenproben angewendet. Ein Vergleich der Messungen findet sich in Tabelle B.12 auf Seite 179. Wie dort auch für ¹³⁷Cs und in Abb. 3.11 für ⁴⁰K zu sehen ist, kann in einigen, aber nicht allen Fällen von einer Übereinstimmung im Rahmen der Messunsicherheiten gesprochen werden.

Um näher zu untersuchen, inwieweit die Datensätze ZSR 1 und ZSR 2 (Bezeichnungen wie in Tabelle B.12) in Bezug auf ¹³⁷Cs und ⁴⁰K übereinstimmen, wurden *t*-Tests gemäß Abschnitt 3.4.2 durchgeführt.

In diesem Fall ist n = 16 für ¹³⁷Cs und n = 17 für ⁴⁰K (siehe Tabelle B.12). Es seien nun A, B, C, D die Abkürzungen für die Datensätze ¹³⁷Cs(ZSR 1), ¹³⁷Cs(ZSR 2), ⁴⁰K(ZSR 1), ⁴⁰K(ZSR 2) und $\Xi := \ln A - \ln B$, sowie $\Pi := \ln C - \ln D$. Die Annahme einer Normalver-



Abbildung 3.11: Grafische Darstellung der Werte für ⁴⁰K aus Tabelle B.12.

teilung von Ξ und Π kann laut Shapiro-Wilk-Test nicht abgelehnt werden. Sowohl für Ξ als auch für Π kann also ein *t*-Test mit $\mu_0 = 0$ in (3.28) durchgeführt werden. Es ist nach (3.29)

$$T_{\Xi} = 4,759 \land T_{\Pi} = 4,226.$$

Setzt man nun $\alpha = 0,01$ und entnimmt man beispielsweise [Fah04] $t_{0,995}(15) = 2,947$ und $t_{0,995}(16) = 2,921$, so erkennt man dass (3.30) in beiden Fällen erfüllt ist, sowohl für Ξ als auch für Π die Nullhypothese also abzulehnen ist.

Trotz dieser Erkenntnisse mussten die Ergebnisse der Messungen ZSR 1 zum Teil verwendet werden. Lagen Messungen im Rahmen dieser Arbeit vor, so wurden diese verwendet.

Vergleich zu [Kal03]

Zwölf der bereits in [Kal03] vermessenen Proben wurden erneut aufbereitet, dabei u.a. auch nachgetrocknet, und vermessen. Es handelte sich hierbei um zwei Heu-, zwei Grasund drei Milchproben sowie jeweils eine Flussschlamm-, Tabak-, Weizen- und Roggenprobe.

Einen Überblick der Resultate bieten die Tabellen B.13 und B.14 auf Seite 180. Verglichen werden dabei die ursprünglich in [Kal03] angegebenen Werte, solche die auf einer erneuten Auswertung der im Rahmen von [Kal03] gewonnenen Rohdaten basieren und die im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen. Die erneute Auswertung der Rohdaten aus [Kal03], die für

diese Arbeit vorlagen, erfolgte unter Anwendung der auch für die Auswertung aller im Rahmen dieser Arbeit vermessenen Proben programmierten und verwendeten Excel-Tabelle. Zudem wurde die Probenmasse korrigiert, da die in [Kal03] vermessenen Proben unvollständig getrocknet waren. Dazu wurde die Probenmasse mittels des aus der Nachtrocknung der betreffenden Probe erhaltenen Faktors verringert. Die nach erneuter Probenaufbereitung im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Werte wurden zu Vergleichszwecken mit eben jenem Faktor auf die vermutlich in [Kal03] angenommene Trockenmasse korrigiert. Bei allen hier betrachteten Werte handelt es sich um auf das jeweilige Probennahmedatum zerfallskorrigierte, da solche in [Kal03] angegeben werden.

Wie den Tabellen B.13 und B.14 zu entnehmen ist, und für ⁴⁰K auch Abb. 3.12, kann von einer Übereinstimmung im Rahmen der Messunsicherheiten zu den Ergebnissen aus [Kal03] gesprochen werden. Lagen Messwerte im Rahmen dieser Arbeit vor, wurden diese für spätere Auswertungen verwendet. Ansonsten wurde auf die aus erneuten Auswertungen der Rohdaten aus [Kal03] gewonnenen Werte zurückgegriffen. Dies ist sinnvoll, da die Auswertungen zu [Kal03] einige kleinere Fehler enthielten und die angenommene Trockenmasse zudem auf unvollständigen Trocknungen beruhte.



Abbildung 3.12: Grafische Darstellung der Werte für ⁴⁰K aus Tabelle B.14. Es ist sinnvoll jeweils grau und gelb eingefärbte Säulen miteinander zu vergleichen.

3.5.8 Vergleiche zu ukrainischen Messungen

Nach erfolgter Entnahme wurden die meisten der Proben durch die SUAEU auch auf ihre spezifische ¹³⁷Cs-Aktivität hin untersucht. Leider erfolgte die Angabe der Messwerte ohne

3 Experimentelles

die dazu gehörigen Unsicherheiten. Auch der Hinweis auf den Massenbezug fehlte in fast allen Fällen. Es war zudem nicht möglich, diese Angaben noch nachträglich zu ermitteln. Auch Nachfragen bezüglich der dort erfolgten Probenaufbereitung und insbesondere des Zustandes in dem die Proben vermessen wurden, konnten nicht vollständig beantwortet werden [Rom04b]. In [Kal03] wurden deutliche Diskrepanzen zwischen den im Rahmen jener Arbeit ermittelten Werten und den Angaben aus der Ukraine festgestellt.

In diesem Abschnitt sollen die hier verwendeten und auf das Probennahmedatum zerfallskorrigierten Messergebnisse für einige Probenmaterialien mit den in der Ukraine gewonnenen verglichen werden. Erschwert wird dieser Vergleich dadurch, dass keine Unsicherheiten zu den ukrainischen Messwerten vorliegen.

Zur Messung aller Materialien wurde in der Ukraine ein NaI-Szintillationsdetektor eingesetzt. Die Angaben zur Probenbehandlung an der SUAEU entstammen [Rom04b] und [Rom04a].

Milch und Frischkäse

Die Messung der Milch- und Frischkäseproben erfolgte an der SUAEU flüssig bzw. ungetrocknet in stets vollen Marinelli-Behältern. Für die Milch- bzw. Käseproben wurden dabei Behälter mit einem Volumen von 11 bzw. 0,51 verwendet.

Ein Vergleich der Messergebnisse findet sich in grafischer Form in Abb. B.2 auf Seite 187. Offensichtlich gibt es bezogen auf den gesamten Datensatz zumindest tendenzielle Übereinstimmungen. Führt man einen t-Test gemäß Abschnitt 3.4.2 durch, so ergibt sich bei $\alpha = 0.01$ kein bedeutender Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden logarithmierten Datensätze.

Bodenproben

Die Bodenproben wurden in der Ukraine vor den Messungen luftgetrocknet und gemischt, jedoch weder ausreichend homogenisiert, noch gesiebt. Die Messungen erfolgten in 11-Marinelli-Behältern. An das ZSR wurden anschließend Teilmengen der in der Ukraine vermessenen Proben verschickt.

Anhand der Abb. B.3, B.4 und B.5 auf den Seiten 187 und 188 wird deutlich, dass in Bezug auf die Bodenproben bestenfalls von einer tendenziellen, keinesfalls aber von einer zufriedenstellenden Übereinstimmung gesprochen werden kann.

Fleisch und Fisch

Fleisch- und Fischproben konnten in der Ukraine nicht verascht werden, da kein Veraschungsofen zur Verfügung stand. Die Fische wurden vor der Messung in kleine Stücke geschnitten und, wie auch Knochen und Kiefer mit Zähnen, zur Messung in 1l-Marinelli-Behälter gefüllt. Für die restlichen Proben verwendete man zylindrische Kunststoffbehälter mit einem Volumen von 0,121.

Bei den an das ZSR versendeten Fischen handelt es sich nicht um die identischen Tiere, sondern lediglich um solche gleicher Art aus dem selben Fang. Von den untersuchten tierischen Organen wurden Stücke abgeschnitten, um in der Messgeometrie das Volumen von 0,121 auszufüllen. Nicht das ganze Organ, sondern nur der jeweils überschüssige Teil des Organs wurde unter der jeweiligen Probennummer an das ZSR geschickt.

Wie die Abb. B.6, B.7 und B.8 auf den Seiten 189 und 190 zeigen, ist die Übereinstimmung der Messergebnisse für Fleisch- und Fischproben nicht gut.

Beeren

Über die Behandlung der Beerenproben vor den Messungen in der Ukraine liegen leider keine Angaben vor.

Abb. B.9 (Seite 190) zeigt eine grobe tendenzielle Übereinstimmung, Abb. B.10 (Seite 191) ist jedoch zu entnehmen, dass für einzelne Proben nicht von einer Übereinstimmung innerhalb der Messunsicherheiten gesprochen werden kann. Die Diskrepanz wird noch verstärkt, wenn man die ZSR-Messwerte statt auf die Trockenmasse auf die Frischmasse bezieht.

Pilze, Gras und Heu

Exemplarisch für die große Bandbreite diverser organischer Proben ähnlicher Konsistenz sollen an dieser Stelle Pilze sowie Gras und Heu betrachtet werden. Diese Proben wurden in der Ukraine vor den Messungen in einem Trockenschrank bei 60 °C getrocknet und anschließend zerkleinert. Die Güte der Zerkleinerung variierte für die verschiedenen Probenarten. So konnten die Pilze wesentlich besser zerkleinert werden als die Gras- und Heuproben. Als Messgeometrie diente die schon für einige Fleischproben benutzte Zylindergeometrie mit einem Volumen von 0,121. Im Anschluss an die Messungen wurde das gesamte vermessene Probenmaterial an das ZSR geschickt.

Die Übereinstimmung für diese Probenmaterialien ist ebenfalls nicht gut (siehe Abb. B.11, B.12 und B.13 auf den Seiten 191 und 192), wobei die Abweichungen insbesondere für Gras und Heu deutlich erkennbar sind.

Fazit

Abschließend ist fest zu stellen, dass die bereits in [Kal03] festgestellten Diskrepanzen zwischen den in der Ukraine und den am ZSR erhaltenen Messergebnissen auch im Rahmen dieser Arbeit beobachtet werden konnten. Aufgrund der anderen, in diesem Kapitel beschriebenen Qualitätssicherungsmaßnahmen wird von der Güte der am ZSR erzielten Ergebnisse ausgegangen. Es kann vermutet werden, dass bei der Probenaufbereitung, der Durchführung der Messungen oder der Messauswertung in der Ukraine nicht mit ausreichender Sorgfalt gearbeitet wurde. In Frage kommen hier beispielsweise die Verwendung ungeeigneter Messgeometrien und Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung der Efficiency. Letztlich geklärt werden kann diese Frage an dieser Stelle jedoch nicht, zumal die Gründe bei den verschiedenen Probenmaterialien womöglich jeweils an anderen Stellen liegen.

$3 \, Experimentelles$

4 Spezifische Aktivitäten untersuchter Radionuklide in Nahrung und Böden

4.1 Cäsium-137 und Kalium-40

4.1.1 Vorbemerkungen

Bis auf zitierte Werte sind alle in diesem Kapitel angegebenen spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten auf den 1. Januar 2003 zerfallskorrigiert. Dieses Datum stellt in etwa den Mittelpunkt des Probennahmezeitraums dar und ist in Kapitel 6 auch das Referenzdatum für die Dosismodellierung. Es ist jedoch zu betonen, dass der Effekt der Zerfallskorrektur oft innerhalb der Messunsicherheiten liegt, da zwischen Probennahme und Messung nur bis zu etwa zwei Jahre liegen. Für ⁴⁰K kann die Zerfallskorrektur ganz vernachlässigt werden.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse beruhen auf den in Tabelle B.2 ab Seite 161 aufgelisteten Messwerten. Dort bzw. im weiteren Verlauf werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

- N: Anzahl an Proben
- AM : Für N > 1: Arithmetischer Mittelwert, sonst: Messwert
- AS : Für N > 1: Arithmetische Standardabweichung, sonst: Standardmessunsicherheit
- GM : Geometrischer Mittelwert
- GS : Geometrische Standardabweichung
- ME : Median
- EW : Schätzwert für den Erwartungswert bei angenommener Lognormalverteilung gemäß (3.27)
- SW : Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests: ,J^c bedeutet, dass die Annahme einer Lognormalverteilung **nicht** abgelehnt werden kann, ,N^c das Gegenteil.
- $R^2_{\rm QQ}~:~R^2\text{-Wert}$ bei Test des Datensatzes auf eine Lognormalverteilung mit einem QQ-Plot.
- AsM : Aschmasse
- TM : Trockenmasse
- FM : Frischmasse / Feuchtmasse

Literaturwerte sind, sofern vorhanden, zu Vergleichszwecken in die Ergebnistabellen direkt unter dem Probenmaterial, auf das sie sich beziehen, eingefügt und kursiv dargestellt. Für alle in diesem Kapitel diskutierten QQ-Plots wurde als Vergleichsverteilung eine Normalverteilung gewählt, mit der stets Datensätze logarithmierter Einzelwerte verglichen wurden (s. Abschnitt 3.4.2).¹ Bei der in den QQ-Plots der Abb. B.14–B.25 (Seiten 193– 195) eingezeichneten Linie handelt es sich um die Gerade y = z (siehe Abschnitt 3.4.2).

Eine Unterscheidung in essbare und nicht-essbare Anteile von Gemüse-, Getreide- und Pilzproben konnte nicht vorgenommen werden, da diese nicht mehr in unbehandelter Form vorlagen und unklar ist, ob nur essbare oder auch nicht-essbare Anteile in den vorhandenen Materialien enthalten sind.

4.1.2 Organische Proben

Milch und Käse

Insgesamt konnten 77 Milchproben, davon 72 Kuhmilch- und 5 Ziegenmilchproben, und vier Proben körnigen Frischkäses der Auswertung zugeführt werden.

Die Tabellen 4.1 und 4.2 geben eine Übersicht über die Ergebnisse für Milch. Die Frischmasse der einzelnen Proben war nicht bekannt und wurde gemäß der [Vah04b] entnommenen Angabe TM/FM = 0.124 errechnet.

Tabelle 4.1: Spezifische $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Aktivitäten}$ in Milch. Alle Angaben in Bq kg^{-1} (TM) bzw. Bq l^{-1} (FM).

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Kuhmilch	72	TM	388	414	199	246	2,5	377	Ν	$0,\!95$
		\mathbf{FM}	48	51	25	31	2,5	47	Ν	$0,\!95$
[Bot00]	33	FM	Berei	ch: 2,8	5-20	g	1,6			
[Shi97]	13	FM	Berei	$ch: g_{-}$	205	54	2,6			
Ziegenmilch	5	TM	119	56	127	109	$1,\!6$	122	J	
		\mathbf{FM}	$14,\!8$	6,9	15,7	$13,\!5$	1,6	$15,\!2$	J	
Alle	77	TM	370	406	234	192	2,5	357	Ν	0,94
		\mathbf{FM}	46	50	29	24	2,5	44	Ν	$0,\!94$

[Bot00]: Proben aus Christinowka, Bezug: 1998/1999[Shi97]: Proben aus Kiew und Volynsky (Ukraine), Bezug: 1994

Für ¹³⁷Cs kann laut Shapiro-Wilk-Tests die Annahme einer Lognormalverteilung zum Teil abgelehnt werden, wohingegen die Güte der Regression in den QQ-Plots eher als gut zu bezeichnen ist. Für Ziegenmilch kann aufgrund der geringen Probenanzahl keine zuverlässige Aussage über zugrunde liegende Verteilungen getroffen werden. Qualitative Unterschiede zwischen den auf Trocken- oder Frischmasse bezogenen Plots bestehen wegen des

¹Insbesondere für die Verteilungen der ⁴⁰K-Gehalte sind jedoch in manchen Fällen auch Normalverteilungen denkbar. Dies äußert sich in den oft geringen geometrischen Standardabweichungen, die diesbezüglich in diesem Kapitel genannt werden.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Kuhmilch	72	TM	391	66	384	385	$1,\!2$	391	J	0,99
		\mathbf{FM}	$48,\!4$	8,2	$47,\! 6$	47,7	1,2	$48,\!4$	J	$0,\!99$
[Vah04b]	25	FM	46	4	46	46	1,1			
[BfS01]		FM	Berei	ch: 35	5-65					
[Shi97]	13	FM	Berei	ch: 38	8-48	44	1,1			
Ziegenmilch	5	TM	344	85	356	336	$1,\!3$	347	J	
		\mathbf{FM}	43	11	44	42	$1,\!3$	43	J	
[Vah04b]	1	FM	56							
Alle	77	TM	388	68	382	382	$1,\!2$	388	J	0,98
		\mathbf{FM}	48,1	8,4	$47,\!3$	$47,\!3$	$1,\!2$	48,1	J	$0,\!98$

Tabelle 4.2: Spezifische $^{40}{\rm K}\mbox{-}{\rm Aktivitäten}$ in Milch. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}$ (TM) bzw. Bq $\rm l^{-1}$ (FM).

einheitlichen Umrechnungsfaktors nicht. Ebenso sind die Plots für den 77 Werte umfassenden Gesamtdatensatz und den nur Werte für Kuhmilch enthaltenden Datensatz aufgrund der kleinen Anzahl an Ziegenmilchproben vergleichbar. Abb. B.14 zeigt den QQ-Plot für die auf die Trockenmasse bezogenen spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Kuhmilch. Dieser Plot deutet trotz der erwähnten Güte der Regression auf eine multimodale Verteilung mit zwei bis drei Modi hin. Es ist daher anzunehmen, dass dem Gesamtdatensatz mehrere Teilgesamtheiten zugrunde liegen. Dieser Effekt kann beispielsweise durch unterschiedlich kontaminierte Weidewiesen bewirkt worden sein. Im Falle der Kuhmilchproben ist eine Zuordnung zu den einzelnen Bauern, deren Kühe die Milch gaben, möglich (Tabelle 4.3). Dabei wird deutlich, dass die von den meisten Bauern zur Verfügung gestellte Kuhmilch vergleichbare ¹³⁷Cs-Gehalte aufweist. Die Milch der Bauern D und G weicht jedoch deutlich zu höheren spezifischen Aktivitäten hin ab.

Tabelle 4.3: Spezifische 137 Cs-Aktivitäten in Kuhmilch der unterschiedlichen Bauern. Alle Angaben in Bq kg⁻¹ und bezogen auf die Trockenmasse.

Bauer	N	AM	AS	GM	GS
А	12	152	68	137	$1,\!6$
В	4	228	177	175	2,4
С	7	307	130	283	1,6
D	13	956	353	867	1,7
Е	4	152	71	136	$1,\!8$
\mathbf{F}	7	187	76	176	1,5
G	5	897	750	519	$_{3,9}$
Η	8	212	120	188	1,6
Ι	1	$70,\!8$	4,3		
J	6	178	49	172	$1,\!3$
Κ	5	125	56	112	$1,\!8$

Der Vergleich mit früher durchgeführten Messungen an Milchproben aus Christinowka zeigt keine gute Übereinstimmung [Bot00]. Allerdings fällt auch die Diskrepanz der Werte aus [Bot00] zu jenen aus [Shi97] auf, die nicht allein durch physikalischen Zerfall erklärbar ist.

Für ⁴⁰K zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Literaturwerten. Zudem kann eine Lognormalverteilung der Messwerte bei einer geringen geometrischen Standardabweichung angenommen werden.² Der Unterschied zwischen arithmetischem und geometrischem Mittel ist in dem Fall erwartungsgemäß gering.

Tabelle 4.4 gibt eine Übersicht über die Resultate bei körnigem Frischkäse. Das Verhältnis von Trocken- zu Frischmasse konnte im Rahmen dieser Arbeit bestimmt werden, da diese Proben in noch unbehandelter Form vorlagen. Trotz der Angabe der Ergebnisse von Verteilungstests ist eine zuverlässige Beurteilung möglicher zugrunde liegender Verteilungen bei N = 4 nicht möglich.

Tabelle 4.4: Spezifische $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}$ und $^{40}\mathrm{K}\text{-}\mathrm{Aktivitäten}$ in körnigem Frischkäse. Alle Angaben in Bq kg^{-1}.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW
Käse	4	^{137}Cs (TM)	150	50	154	142	1,5	153	J
		^{137}Cs (FM)	43	12	46	41	1,4	43	J
		${}^{40}{ m K}$ (TM)	151	27	147	150	1,2	152	J
		${}^{40}{ m K}~{ m (FM)}$	44	10	41	44	1,2	44	J

Tierische Proben

Der Auswertung konnten Muskelfleisch, Knochen, Kiefer mit Zähnen und einige Organe von Haus- und Wildschwein (*Sus scrofa*) sowie eine Niere eines Rehs (*Capreolus capreolus*) zugeführt werden. Bereits im Rahmen von [Kal03] wurden die essbaren Anteile einiger Fische vermessen. Es handelt sich hierbei um die Gattung Hecht (*Esox*), die Arten Schleie (*Tinca tinca*), Karpfen (*Cyprinus carpio*), Karausche (*Carassius carassius*) und Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*), sowie Barsche (Familie *Percidae*).

Tabelle 4.5 zeigt die Messwerte der tierischen Proben bis auf die Fischproben. Da einige der Proben im veraschten und andere im gefriergetrockneten Zustand vermessen wurden, beziehen sich alle Werte auf die Frischmasse.

Die Ergebnisse der Verteilungstests sind aufgrund des geringen Probenumfangs wenig aussagekräftig. An der hohen geometrischen Standardabweichung von 7,7 und dem zugehörigen QQ-Plot (Abb. B.15) zeigt sich, dass es für ¹³⁷Cs nicht sinnvoll ist, alle Proben zu einem Datensatz zusammenzufassen. Dies liegt insbesondere daran, dass die Organe der in den Wäldern lebenden Wildschweine wesentlich höhere ¹³⁷Cs-Gehalte aufweisen als die der Hausschweine (siehe Abschnitt 2.4.4).

Gemäß Tabelle 4.5 erwies sich bei den Hausschweinen die Leber als das Probenmaterial mit der, bezogen auf die Frischmasse, höchsten spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivität. Dies ist jedoch auf

²Für Kalium ist in organischen Proben ein niedriger Wert der geometrischen Standardabweichung typisch und mit dem Effekt der Homöostase zu erklären (siehe Abschnitte 2.1.3 und 2.2).

einen besonders hohen Messwert bei der Probe Nr. 36 zurückzuführen. Die Leberproben mit den Nummern 518 und 545 zeigen deutlich geringere spezifische ¹³⁷Cs-Aktivitäten. Dies wird unter Berücksichtigung des jeweiligen Massenbezugs aus Tabelle B.2 ersichtlich. Prinzipiell reichert sich Cäsium, welches aufgrund seines ähnlichen chemischen Verhaltens weitestgehend dem Kaliumstoffwechsel folgt, bei Hausschweinen insbesondere in Nieren und Muskeln an, wie ein in [Bel98] beschriebener Fütterungsversuch an Tieren aus einer gering kontaminierten Region der Ukraine zeigt.

Für ⁴⁰K ist erwartungsgemäß kein wesentlicher Unterschied zwischen Haus- und Wildschweinen erkennbar, zudem ist die Übereinstimmung mit dem Literaturwert gegeben. Für ¹³⁷Cs fällt der Vergleich mit Literaturangaben schwieriger, da unklar ist, auf welche Art oder Arten Fleisch sich der Wert in [Bot00] bezieht. Auffällig sind die geringen ⁴⁰K-Gehalte in Kiefern und Knochen. Bedingt dadurch zeigt sich im QQ-Plot des Gesamtdatensatzes (Abb. B.16) eine rechtssteile Verteilung.

Tabelle 4.5: Spezifische 137 Cs- und 40 K-Aktivitäten in Tierproben (außer Fisch). Alle Angaben in Bq kg⁻¹ und bezogen auf die Frischmasse (FM).

Material	N	Nuklid	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Schweinemuskel	6	^{137}Cs	40	27	29	34	$1,\!9$	41	J	
		$^{40}\mathrm{K}$	105	42	99	98	1,5	106	J	
Schweineleber	3	$^{137}\mathrm{Cs}$	150	204	47	67	4,9	239	J	
		$^{40}\mathrm{K}$	71	34	86	64	$1,\!8$	77	J	
Schweineniere	4	$^{137}\mathrm{Cs}$	20,9	5,6	$22,\!6$	20,3	1,4	$21,\!3$	J	
		$^{40}\mathrm{K}$	80	23	87	77	1,4	81	J	
Schweineknochen	5	$^{137}\mathrm{Cs}$	$12,\!5$	6,1	11,2	$11,\!3$	$1,\!6$	$12,\!8$	J	
		$^{40}\mathrm{K}$	38	16	33	35	1,5	38	J	
Schweinekiefer	2	$^{137}\mathrm{Cs}$	$13,\!3$	6,5		$12,\!5$	1,7	14,2		
mit Zähnen		$^{40}\mathrm{K}$	24	14		22	1,8	27		
Wildschweinlunge	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	1562	78						
		$^{40}\mathrm{K}$	$77,\!5$	4,1						
Wildschweinherz	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	2449	124						
		$^{40}\mathrm{K}$	$93,\!4$	5,1						
Wildschweinniere	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	2377	119						
		$^{40}\mathrm{K}$	$71,\!5$	4,6						
Rehniere	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	8211	412						
		$^{40}\mathrm{K}$	89,8	$_{9,8}$						
Alle	24	$^{137}\mathrm{Cs}$	644	1766	23	52	7,7	418	Ν	0,79
		$^{40}\mathrm{K}$	74	37	79	64	$1,\!8$	76	Ν	$0,\!91$
Fleisch [Bot00]		137 Cs	20							
Fleisch [BfS01]		^{40}K	Berei	ch: 60–1	120					

[Bot00]: Proben aus drei Dörfern der Zone II

Tabelle 4.6 gibt eine Übersicht über die Messwerte für Fischproben.

Der Vergleich mit [Bot00] liefert für ¹³⁷Cs erneut keine gute Übereinstimmung, wobei ebenfalls nicht bekannt ist, auf welche Fischarten sich jener Wert bezieht. Es fallen Unterschiede zwischen den verschiedenen Fischarten auf, denn wie in [Tra04] wurde beispielsweise ein deutlicher Unterschied zwischen den ¹³⁷Cs-Gehalten in Hecht und Karausche beobachtet. In [Tra04] wird in dem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass es sich bei Hechten um Raubfische handelt. Die zur Ordnung der Karpfenartigen gehörende Karausche ernährt sich hingegen in Grundnähe von Kleinlebewesen wie Schnecken und Algenaufwuchs.

In Bezug auf ⁴⁰K ist für die Fischproben eine gute Übereinstimmung mit dem Literaturwert zu entnehmen. Zudem fällt der Wert 1,0 für die geometrische Standardabweichung auf. In dem Fall entspricht eine Lognormalverteilung der Normalverteilung mit der angegebenen arithmetischen Standardabweichung.

Material	N	Nuklid	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Hecht	4	$^{137}\mathrm{Cs}$	142	35	141	139	$1,\!3$	143	J	
		$^{40}\mathrm{K}$	108,4	6,2	106	108,3	1,1	108,4	J	
Schleie	2	$^{137}\mathrm{Cs}$	191	101		177	1,7	207		
		$^{40}\mathrm{K}$	105,3	0,1		105,3		105,3		
Karpfen	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	$83,\!8$	4,2						
		$^{40}\mathrm{K}$	114,3	$6,\!0$						
Karausche	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	21,4	1,1						
		$^{40}\mathrm{K}$	112,0	6,3						
Rotfeder	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	41,5	2,3						
		$^{40}\mathrm{K}$	114,4	6,6						
Barsch	1	$^{137}\mathrm{Cs}$	105,3	6,1						
		$^{40}\mathrm{K}$	111,8	6,8						
Alle	10	$^{137}\mathrm{Cs}$	120	69	113	99	2,1	129	J	0,90
		$^{40}\mathrm{K}$	109,7	$4,\!9$	109,1	$109,\! 6$	$1,\!0$	109,7	J	$0,\!89$
Fisch [Bot00]		^{137}Cs	12							
Fisch [BfS01]		^{40}K	Bereic	h: 80–	120					

Tabelle 4.6: Spezifische 137 Cs- und 40 K-Aktivitäten in Fisch. Alle Angaben in Bq kg⁻¹ und bezogen auf die Frischmasse.

[Bot00]: Proben aus drei Dörfern der Zone II

Weide- und Wiesenbewuchs

Unter dem Begriff "Weide- und Wiesenbewuchs' sind die beiden Probenarten Gras und Heu zusammengefasst. Da es sich bei Heu um getrocknetes Gras handelt, sind für diese Materialien für auf die Trockenmasse bezogene spezifische Aktivitäten identische Ergebnisse zu erwarten. Dies konnte durch die Messungen näherungsweise bestätigt werden, wie die Tabellen 4.7 und 4.8 zeigen. Ebenso wird ersichtlich, dass die Annahmen von Lognormalverteilungen nicht abzulehnen sind, wenngleich bei den ¹³⁷Cs-Werten für Gras die Shapiro-Wilk-Tests und QQ-Plots widersprüchliche Ergebnisse liefern. Der zugehörige QQ-Plot (Abb. 3.5 auf Seite 59) zeigt eine leicht linkssteile Verteilung mit einem möglichen zweiten, schwach ausgeprägten Modus bei hohen Werten (siehe Abschnitt 5.2.3).

Tabelle 4.7: Spezifische $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Aktivit}$ äten in Weide- und Wiesenbewuchs. Alle Angaben in Bq $\,\mathrm{kg}^{-1}.$

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Gras	55	TM	603	672	289	339	3,0	618	Ν	0,97
		\mathbf{FM}	90	101	43	51	3,0	93	Ν	$0,\!97$
Heu	23	TM	540	571	208	283	3,4	605	J	0,94
		\mathbf{FM}	465	492	179	244	3,4	522	J	$0,\!94$

Tabelle 4.8: Spezifische ⁴⁰K-Aktivitäten in Weide- und Wiesenbewuchs. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Gras	55	TM	626	246	549	586	1,4	625	J	0,98
		\mathbf{FM}	94	37	82	88	1,4	94	J	$0,\!98$
Heu	23	TM	535	240	479	497	$1,\!4$	532	J	$0,\!94$
		\mathbf{FM}	461	207	413	429	1,4	459	J	$0,\!94$
[Vah04b]	13	TM	580	196		547	1,4	585		

Die deutlichen Unterschiede bei den auf die Frischmasse bezogenen spezifischen Aktivitäten sind in den für Gras und Heu unterschiedlichen Definitionen der Frischmasse begründet. Da die Frischmassen dieser Proben im Rahmen dieser Arbeit nicht abgewogen werden konnten, wurden für die Umrechnungen [Fau88] folgende Werte entnommen:

 $\begin{array}{rcl} ({\rm TM/FM})_{\rm Gras} &=& 0,\!150 \\ ({\rm TM/FM})_{\rm Heu} &=& 0,\!863. \end{array}$

Für 40 K konnten die Messwerte mit Ergebnissen aus [Vah04b] verglichen werden. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung.

Getreide

Unter dem Begriff, Getreide' sind Proben der Gattungen Weizen (*Triticum*), Hafer (*Avena*) und Roggen (*Secale*) sowie der Art Mais (*Zea mays*) zusammengefasst.

Die Umrechnung von der Trockenmasse zur Frischmasse erfolgte mit [Mes00] entnommenen Werten:

$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Hafer}}$	=	$0,\!870$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Mais}}$	=	$0,\!875$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Roggen}}$	=	$0,\!863$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Weizen}}$	=	0,868.

Alle Getreidesorten weisen ähnliche ⁴⁰K-Gehalte auf und gehören zu den Probenarten mit vergleichsweise niedrigen spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten (Tabellen 4.9 und 4.10), wobei die ¹³⁷Cs-Gehalte in Hafer und Roggen höher sind als in Mais und Weizen.

Für 40 K zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Literaturangaben.

Die Verteilungstests für die nach den Getreidesorten unterschiedenen Datensätze sind aufgrund des geringen Probenumfanges wenig aufschlussreich. Für den zusammengefassten Datensatz der auf die Frischmasse bezogenen spezifischen Aktivitäten kann die Annahme einer Lognormalverteilung sowohl für ¹³⁷Cs als auch für ⁴⁰K gemäß Shapiro-Wilk-Test nicht abgelehnt werden. Die QQ-Plots (Abb. B.17 und B.18) lassen jedoch auf mehrere zugrunde liegende Teilgesamtheiten schließen, die vermutlich in den Unterschieden zwischen den Getreidesorten begründet sind.³

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Hafer	3	TM	$27,\!6$	7,0	27,1	$27,\!0$	1,3	$27,\!9$	J	
		\mathbf{FM}	$24,\! 0$	6,1	$23,\!5$	$23,\!5$	1,3	$24,\!3$	J	
Mais	3	TM	7,6	5,9	5,7	6,2	2,2	8,5	J	
		\mathbf{FM}	6,7	5,2	5,0	5,4	2,2	7,4	J	
Roggen	7	TM	23	23	12	16	2,4	23	J	
		\mathbf{FM}	20	20	11	14	2,4	20	J	
Weizen	8	TM	7,6	$1,\!9$	7,2	7,4	1,3	7,6	J	0,96
		\mathbf{FM}	6,6	1,6	6,3	6,5	1,3	6,6	J	0,96
Alle	21	TM	$15,\!6$	0,8	9,4	11,2	2,2	15,1	J	0,94
		\mathbf{FM}	$13,\!5$	0,8	8,1	9,7	2,2	$13,\!1$	J	0,94

Tabelle 4.9: Spezifische ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Getreide. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

³Die aufgeführten QQ-Plots betreffen jeweils die auf die Trockenmasse bezogenen spezifischen Aktivitäten. Zieht man die Frischmasse heran, zeigen die QQ-Plots sehr ähnliche Merkmale, die aber im Falle des ⁴⁰K schwächer ausgeprägt sind.

Material	N	Bezug	AM	\mathbf{AS}	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R_{\rm QQ}^2$
Hafer	3	TM	164	18	158	163	1,1	164	J	
		\mathbf{FM}	143	15	137	142	1,1	143	J	
Mais	3	TM	148	20	144	147	1,1	148	J	
		\mathbf{FM}	129	18	126	128	1,1	130	J	
Roggen	7	TM	157	15	157	157	1,1	157	J	
		\mathbf{FM}	136	13	135	135	1,1	136	J	
Weizen	8	TM	151	19	154	150	1,1	151	J	$0,\!81$
		\mathbf{FM}	131	16	134	130	1,1	131	J	$0,\!81$
Alle	21	TM	154	17	157	153	1,1	154	Ν	0,93
		\mathbf{FM}	134	15	135	133	1,1	134	J	$0,\!93$
Getreide [Vah04b]	17	FM	135	67		125	1,5	135		0,94
Getreide [BfS01]		FM	Berei	ich: $8'$	7–246					

Tabelle 4.10: Spezifische 40 K-Aktivitäten in Getreide. Alle Angaben in Bq kg $^{-1}$.

Wurzelgemüse

Die Gemüsesorten Kartoffel (Solanum tuberosum), Möhre (Daucus carota) und Rote Bete (Beta vulgaris) sind unter dem Begriff "Wurzelgemüse" zusammengefasst.

Zur Umrechnung auf die Frischmasse wurden [Mes00] die folgenden Angaben entnommen:

$$\begin{array}{rcl} (TM/FM)_{Kartoffeln} &=& 0,222 \\ (TM/FM)_{M\"ohren} &=& 0,118 \\ (TM/FM)_{RoteBete} &=& 0,112. \end{array}$$

Die Tabellen 4.11 und 4.12 geben eine Übersicht über die für diese Proben erhaltenen Werte.

Die auf die Frischmasse bezogenen ¹³⁷Cs-Gehalte sind für alle drei Probenarten ähnlich. Legt man die Trockenmasse zugrunde, zeigen sich gewisse Unterschiede, wodurch eine etwas höhere geometrische Standardabweichung und ein niedrigerer R^2_{QQ} -Wert zu beobachten ist.

Wiederum ist eine Diskrepanz zu einer Angabe aus [Bot00] zu beobachten, wobei unklar ist, ob mit der Bezeichnung "Rüben" Wurzelgemüse allgemein oder eine bestimmte Art gemeint ist.

Die Übereinstimmung mit den Literaturwerten ist für 40 K sehr gut. Der auf die Frischmasse bezogene 40 K-Gehalt in Kartoffeln ist gegenüber Möhren und Roter Bete leicht erhöht. Die Annahme einer Lognormalverteilung kann jedoch für die zusammengefassten Datensätze nicht abgelehnt werden.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Kartoffeln	6	TM	50	39	30	40	2,0	51	J	
		\mathbf{FM}	$11,\!1$	8,6	6,7	8,9	2,0	$11,\!2$	J	
Möhren	4	TM	96	65	88	78	2,2	106	J	
		\mathbf{FM}	$11,\!3$	7,7	10,4	9,2	2,2	$12,\!5$	J	
Rote Bete	5	TM	164	262	47	72	3,7	170	J	
		\mathbf{FM}	18	29	5	8	3,7	19	J	
Alle	15	TM	100	154	47	58	2,6	91	J	0,90
		\mathbf{FM}	14	17	7	9	2,4	13	J	0,94
Rüben [Bot00]		FM	3,8							

Tabelle 4.11: Spezifische 137 Cs-Aktivitäten in Wurzelgemüse. Alle Angaben in Bq kg $^{-1}$.

[Bot00]: Proben aus drei Dörfern der Zone II

Tabelle 4.12: Spezifische 40 K-Aktivitäten in Wurzelgemüse. Alle Angaben in Bq kg $^{-1}$.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Kartoffeln	6	TM	857	116	839	850	$1,\!1$	858	J	
		\mathbf{FM}	190	26	186	189	1,1	191	J	
[Vah04b]	\mathcal{Z}	FM	129	56						
[BfS01]		FM	Bereio	ch: 122	2–194					
Möhren	4	TM	937	250	952	910	1,3	948	J	
		\mathbf{FM}	111	30	112	107	1,3	112	J	
[Vah04b]	1	FM	109	6						
[BfS01]		FM	Bereio	ch: 72-	-134					
Rote Bete	5	TM	1063	309	1020	1028	1,3	1072	J	
		\mathbf{FM}	119	35	114	115	1,3	120	J	
[Vah04b]	$\mathcal{2}$	FM	141	64						
Alle	15	TM	947	232	921	923	1,3	948	J	0,99
		\mathbf{FM}	145	47	145	138	1,4	146	J	$0,\!98$
[Vah04b]	10	FM	126	78		110	1,7	127		

Blattgemüse

Unter dem Begriff ,Blattgemüse' wurden die Art Sauerampfer (*Rumex acetosa*), sowie die Gattungen Petersilie (*Petroselinum*), Kohl (*Brassica*) und Kopfsalat (*Valerianella*) zusammengefasst.

Zur Umrechnung auf die Frischmasse wurden [Mes00], bzw. für Petersilie [Vah04b], die folgenden Angaben entnommen:

$$\begin{array}{rcl} (TM/FM)_{Sauerampfer} &=& 0,199 \\ (TM/FM)_{Petersilie} &=& 0,119 \\ (TM/FM)_{Kohl} &=& 0,097 \\ (TM/FM)_{Kopfsalat} &=& 0,050. \end{array}$$

Wie den Tabellen 4.13 und 4.14 zu entnehmen ist, variieren die spezifischen Aktivitäten von ¹³⁷Cs für die unterschiedlichen Probenarten recht stark, was zu den relativ hohen geometrischen Standardabweichungen für den zusammengefassten Datensatz führt. Weniger ausgeprägt gilt dies auch für ⁴⁰K. Sowohl für ¹³⁷Cs als auch für ⁴⁰K wurden die, bezogen auf die Frischmasse, höchsten spezifischen Aktivitäten in Sauerampfer gemessen. Die von allen Blattgemüsesorten niedrigsten ¹³⁷Cs-Gehalte konnten in Kohl gefunden werden. Die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen ¹³⁷Cs-Werte für Kohl liegen allerdings höher als der in [Bot00] angegebene Wert.

Alle an Datensätzen zu Blattgemüse durchgeführten Shapiro-Wilk-Tests lassen die Ablehnung der Annahme einer Lognormalverteilung nicht zu. Deutlich bimodal ist jedoch trotzdem die Verteilung der auf die Frischmasse bezogenen ⁴⁰K-Messwerte in allen Blattgemüsen (Abb. B.19). Dies ist auf die Diskrepanzen zwischen den ⁴⁰K-Gehalten in Sauerampfer und Petersilie einerseits sowie Kohl und Kopfsalat andererseits zurückzuführen.

Für ⁴⁰K kann für Petersilie, Kohl und Kopfsalat von einer Übereinstimmung zu den genannten Literaturangaben gesprochen werden. Die Abweichung der Werte des zusammengefassten Datensatz zu den Werten für Blattgemüse allgemein aus [Vah04b] läßt sich vermutlich dadurch erklären, dass sich der Datensatz aus jener Arbeit aus anderen Blattgemüsesorten zusammensetzt. So war der vergleichsweise kaliumhaltige Sauerampfer nicht Bestandteil der Auswertung in jener Arbeit, dafür aber u. a. diverse Kohlsorten, Lauch und Rhabarber mit deutlich geringeren ⁴⁰K-Gehalten.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R_{\rm QQ}^2$
Sauerampfer	9	TM	597	509	556	397	2,8	675	J	0,95
		\mathbf{FM}	119	101	111	79	2,8	134	J	$0,\!95$
Petersilie	1	TM	137,4	7,3						
		\mathbf{FM}	16,4	$0,\!9$						
Kohl	6	TM	84	36	89	77	$1,\!6$	87	J	
		\mathbf{FM}	8,2	3,4	8,6	7,5	1,6	8,4	J	
[Bot00]		FM	1,5							
Kopfsalat	2	TM	675	338		631	1,7	724		
		\mathbf{FM}	34	17		32	1,7	36		
Alle	18	TM	409	444	166	228	3,1	437	J	0,96
		\mathbf{FM}	67	88	26	30	3,8	73	J	$0,\!97$

Tabelle 4.13: Spezifische ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Blattgemüse. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

[Bot00]: Proben aus drei Dörfern der Zone II

Tabelle 4.14: Spezifische ⁴⁰K-Aktivitäten in Blattgemüse. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Sauerampfer	9	TM	1519	444	1374	1470	$1,\!3$	1521	J	0,91
		\mathbf{FM}	302	88	273	293	1,3	303	J	0,91
Petersilie	1	TM	1604	89						
		\mathbf{FM}	191	11						
[Vah04b]	$\mathcal{2}$	FM	168	69						
Kohl	6	TM	1072	124	1092	1066	$1,\!1$	1073	J	
		\mathbf{FM}	104	12	106	103	1,1	104	J	
[BfS01]		FM	Berei	ch: 59-	-196					
Kopfsalat	2	TM	1869	231		1862		1876		
		\mathbf{FM}	93	12		93		94		
[Vah04b]	$\mathcal{2}$	FM	$\tilde{\gamma}\tilde{\gamma}$	27						
Alle	18	TM	1413	417	1302	1362	$1,\!3$	1414	J	0,96
		\mathbf{FM}	207	118	202	178	$1,\!8$	209	J	0,92
[Vah04b]	18	FM	110	56		98	1,6	110		

Sonstige Pflanzen

Nicht in die Kategorien Wurzelgemüse und Blattgemüse ließen sich Pflanzen der Arten Tomate (Solanum lycopersicum) und Gurke (Cucumis sativus) sowie der Gattungen Tabak (Nicotiana) und Erbse (Pisum) einordnen. Die Tabellen 4.15 und 4.16 zeigen die Resultate für diese Probensorten.

Dabei wurden [Mes00] zur Umrechnung auf die Frischmasse die folgenden Angaben entnommen:

$(TM/FM)_{Erbse}$	=	0,227
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Gurke}}$	=	0,032
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Tabak}}$	=	$0,\!100$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Tomate}}$	=	0,058.
(TM/FM) _{Gurke} (TM/FM) _{Tabak} (TM/FM) _{Tomate}	= = =	0,032 0,100 0,058

Tabelle 4.15: Spezifische $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Aktivit}$ äten in Erbsen, Gurken, Tabak und Tomaten. Alle Angaben in Bq $\mathrm{kg}^{-1}.$

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW
Erbse	2	TM	55	58		37	$_{3,9}$	93	
		\mathbf{FM}	13	13		8	$_{3,9}$	21	
Gurke	5	TM	203	97	243	179	$1,\!8$	213	J
		\mathbf{FM}	6,5	3,1	7,8	5,7	$1,\!8$	6,8	J
Tabak	5	TM	1038	1118	569	727	2,4	1064	J
		\mathbf{FM}	104	112	57	73	2,4	106	J
Tomate	5	TM	167	177	87	110	2,7	182	J
		\mathbf{FM}	10	10	5	6	2,7	11	J

Tabelle 4.16: Spezifische $^{40}{\rm K}\mbox{-}{\rm Aktivitäten}$ in Erbsen, Gurken, Tabak und Tomaten. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW
Erbse	2	TM	472	13		472		472	
		\mathbf{FM}	107,1	2,9		107,0		107,1	
Gurke	5	TM	1375	188	1307	1366	1,1	1377	J
		\mathbf{FM}	44,0	$_{6,0}$	$41,\!8$	43,7	1,1	44,1	J
Tabak	5	TM	1257	432	1341	1196	1,4	1275	J
		\mathbf{FM}	126	43	134	120	1,4	128	J
Tomate	5	TM	1126	218	1105	1109	1,2	1131	J
		\mathbf{FM}	65	13	64	64	1,2	66	J

Eine Übersicht über den zusammengefassten Datensatz aller Gemüseproben (Tomaten, Gurken, Erbsen, Wurzel- und Blattgemüse) zeigt Tabelle 4.17. Für 40 K ist dabei eine Übereinstimmung zu dem zusammengefassten Datensatz aller Gemüseproben in [Vah04b] festzustellen.

Nuklid AM AS ME GM GS SW NBezug EW $R_{\rm QQ}^2$ $^{137}\mathrm{Cs}$ 45TM240329 115120 3,2 239J 0,9834 3,529Ν 0,94FM 621013 ^{40}K 45TM1180 40011781116 $1,\!4$ 1184J 0,98 J 0,99 \mathbf{FM} 148981141221,9149[Vah04b]FM1,6 0,9528 116 64 102115

Tabelle 4.17: Spezifische Aktivitäten von $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}$ in Gemüse. Alle Angaben in Bq $\,\mathrm{kg}^{-1}.$

Beeren

Bei den Beeren handelte es sich um Früchte der Gattungen Erdbeere (*Fragaria*) und Heidelbeere (*Vaccinium*) sowie der Arten Himbeere (*Rubus idaeus*) und Preiselbeere (*Vaccinium vitis-idaea*). Von Him- und Erdbeeren konnten sowohl Proben von in Wäldern als auch außerhalb der Wälder wachsenden Pflanzen (,Hausbeeren') untersucht werden. Heidel- und Preiselbeeren wurden ausschließlich in Wäldern geerntet.

Zur Umrechnung auf die Frischmasse wurden [Mes00] die folgenden Angaben entnommen:

$$\begin{array}{rcl} (TM/FM)_{Himbeeren} &=& 0.155 \\ (TM/FM)_{Heidelbeeren} &=& 0.151 \\ (TM/FM)_{Erdbeeren} &=& 0.105. \end{array}$$

Für Preiselbeeren lag keine Angabe vor. Daher wurde der arithmetische Mittelwert aller Beerensorten aus [Mes00] verwendet:

$$(TM/FM)_{Preiselbeeren} = 0.148.$$

Die der Tabelle 4.18 zu entnehmenden Ergebnisse für ¹³⁷Cs verdeutlichen die große Bedeutung des Standortes für die Beeren. Sowohl Waldhimbeeren als auch Walderdbeeren zeigen deutlich höhere ¹³⁷Cs-Gehalte als die Früchte der außerhalb der Wälder wachsenden entsprechenden Pflanzen. Von allen Beeren wurden in Heidelbeeren die höchsten ¹³⁷Cs-Gehalte gefunden. Himbeeren und insbesondere Erdbeeren sind deutlich geringer belastet. Dies ist vermutlich durch physiologische Unterschiede begründet, denn Himbeere und Erdbeere zählen aus botanischer Sicht nicht zu den Beeren. Sowohl Himbeer- als auch Erdbeerpflanze gehören zu der Familie der Rosengewächse. Bei der Himbeere handelt es sich um eine so genannte "Sammelsteinfrucht", bei der Erdbeere um eine "Sammelnussfrucht". Desweiteren ist festzustellen, dass auch Himbeeren und Erdbeeren sich bezüglich der ¹³⁷Cs-Gehalte unterscheiden. Sowohl Haus- als auch Walderdbeeren sind weniger stark kontaminiert als die jeweils entsprechenden Himbeeren.

Anhand der großen geometrischen Standardabweichung von > 11 wird deutlich, dass die verschieden Beerensorten nicht zu einem Datensatz zusammengefasst werden können. Dies ist insbesondere für die Modellierung der Ingestionsdosis von Bedeutung, da es nicht ausreicht nur den Verzehr von Beeren allgemein anzugeben. Vielmehr muss zwischen den Beiträgen der Beerensorten zum Gesamtverzehr differenziert werden.

Den Verteilungstests zufolge kann allerdings die Annahme einer Lognormalverteilung für den Gesamtdatensatz nicht abgelehnt werden. Trotz einem R^2_{QQ} -Wert von 0,95 weist der QQ-Plot (Abb. B.20) auf eine rechtssteile Verteilung hin, der mehrere Teilgesamtheiten zugrunde liegen.

Ein signifikanter Unterschied ist zu dem in [Bot00] angegebenen Wert des ¹³⁷Cs-Gehaltes von Waldbeeren festzustellen, wobei leider nicht bekannt ist, um welche Beerensorten es sich dort genau handelte. Hervorzuheben ist auch die vergleichsweise geringe dort angegebene geometrische Standardabweichung von nur 2,5. Tabelle 4.18 ist selbst für Waldbeeren einer bestimmten Art eine geometrische Standardabweichung von 4–5 zu entnehmen.

Tabelle 4.19 zeigt die Ergebnisse für 40 K. In diesem Fall kann von einer weitaus höheren Homogenität des zusammengefassten Datensatzes gesprochen werden. Auffällig ist jedoch erneut ein Unterschied zwischen "echten" Beeren sowie Himbeeren und Erdbeeren. In diesem Fall finden sich etwas höhere spezifische Aktivitäten bei den letztgenannten Früchten. Die Diskrepanz ist jedoch weitaus weniger ausgeprägt als für 137 Cs.

Eine deutliche Abweichung der gemessenen Werte ist zu den Angaben für Beeren aus [BfS01] festzustellen. Eine solche Abweichung wurde allerdings auch in [Vah04b] beobacht. Die beiden Messwerte von Beerenproben aus jener Arbeit stehen in guter Übereinstimmung zu den im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Werten.

Neben den eigentlichen Beeren lagen für die Waldbeeren mit Ausnahme der Preiselbeeren auch zugehörige Proben organischer Auflagen vor (Tabelle 4.20). Dabei handelt es sich um eine Schicht organischen Materials unter der Pflanze und über dem Boden. Unterschiedliche Angaben für N für ¹³⁷Cs und ⁴⁰K bei gleichem Probenmaterial weisen dabei auf primäre Messergebnisse für ⁴⁰K hin, die unter der Nachweisgrenze liegen. Dies ist auf zu gering gewählte Messzeiten bei Messungen, die im Rahmen von [Kal03] durchgeführt wurden, zurückzuführen.

Die zu den Erdbeeren gehörigen organischen Auflagen zeigen, ebenso wie die Früchte selbst, die im Vergleich geringsten ¹³⁷Cs-Gehalte. Die ⁴⁰K-Gehalte in organischen Auflagen unter Heidelbeeren sind geringer als die in solchen unter Himbeeren und Erdbeeren, was ebenfalls den bereits in Bezug auf die Früchte erfolgten Beobachtungen entspricht.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimb.	8	TM	8563	7648	7327	4535	4,8	15613	J	0,86
		\mathbf{FM}	1327	1186	1136	703	4,8	2420	J	0,86
Haushimb.	2	TM	376	268		325	2,2	442		
		\mathbf{FM}	58	42		50	2,2	69		
Heidelb.	11	TM	64583	57246	70154	35470	4,2	99082	J	$0,\!89$
		\mathbf{FM}	9752	8644	10593	5356	4,2	14961	J	$0,\!89$
Walderdb.	3	TM	2175	1701	2899	1317	4,5	4088	J	
		\mathbf{FM}	228	179	304	138	4,5	429	J	
Hauserdb.	2	TM	67	58		53	2,7	88		
		\mathbf{FM}	7,0	6,1		5,5	2,7	9,2		
Preiselb.	1	TM	42873	2147						
		\mathbf{FM}	6345	318						
Alle	27	TM	30711	46426	7983	5873	$11,\!2$	109168	J	0,95
		\mathbf{FM}	4632	7013	1237	837	$12,\!2$	18918	J	0,95
Waldbeeren	30	TM	Bereich	:		1500	2,5			
[Bot00]			500-50	00						

Tabelle 4.18: Spezifische 137 Cs-Aktivitäten in Beeren. Alle Angaben in Bq kg $^{-1}$.

[Bot00]: Proben aus Christinowka, Bezug: 1998/1999

Tabelle 4.19: Spezifische 40 K-Aktivitäten in Beeren. Alle Angaben in Bq kg $^{-1}$.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimbeeren	8	TM	266	29	260	264	1,1	266	J	0,96
		\mathbf{FM}	$41,\!2$	4,4	$40,\!3$	$41,\! 0$	1,1	$41,\!2$	J	$0,\!96$
Haushimbeeren	2	TM	351	135		338	1,5	365		
		\mathbf{FM}	54	21		52	1,5	57		
Heidelbeeren	11	TM	189	17	188	188	1,1	189	J	$0,\!99$
		\mathbf{FM}	$28,\!6$	2,5	$28,\!4$	$28,\!5$	1,1	$28,\! 6$	J	$0,\!99$
Walderdbeeren	3	TM	396	31	397	396	1,1	397	J	
		\mathbf{FM}	$41,\! 6$	3,3	41,7	$41,\!5$	1,1	41,7	J	
Hauserdbeeren	2	TM	476	25		476		477		
		\mathbf{FM}	$50,\!0$	2,6		$50,\!0$		$50,\!0$		
Preiselbeeren	1	TM	197	14						
		\mathbf{FM}	29,1	2,0						
Alle	27	TM	269	100	236	253	$1,\!4$	268	Ν	0,92
		\mathbf{FM}	37	10	36	36	1,3	37	J	$0,\!95$
Beeren [BfS01]		FM	Berei	ch: 10	7–190					
Obst [BfS01]		FM	Berei	ch: 23	-164					
Himbeere [Vah04b]	1	FM	36	$\mathcal{2}$						
Brombeere [Vah04b]	1	FM	47	$\mathcal{2}$						

OA zu	Nuklid	N	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimbeeren	$^{137}\mathrm{Cs}$	6	49914	45625	32791	27722	4,3	79511	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	5	165	43	146	160	$1,\!3$	166	J	
Heidelbeeren	$^{137}\mathrm{Cs}$	10	75107	89883	52179	45682	$2,\!9$	79846	J	$0,\!95$
	$^{40}\mathrm{K}$	8	104	39	103	97	1,5	105	J	$0,\!96$
Walderdbeeren	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	4786	3043	5699	3863	2,4	5753	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	198	82	168	188	1,5	203	J	
Alle	$^{137}\mathrm{Cs}$	19	56048	72602	42577	26415	4,1	72369	J	0,97
	$^{40}\mathrm{K}$	16	140	61	134	128	$1,\!6$	142	J	0,97

Tabelle 4.20: Spezifische Aktivitäten von 137 Cs und 40 K in Organischen Auflagen unter Beeren. Alle Angaben in Bq kg⁻¹ und bezogen auf die Trockenmasse.

Pilze

Im Rahmen dieser Arbeit lagen Proben der Pilzarten Birkenpilz (*Leccinum scabrum*), Butterpilz (*Suillus luteus*), Steinpilz (*Boletus edulis*), Pfifferling (*Cantharellus cibarius*) und Rotkappe (*Leccinum aurantiacum*) vor. Alle diese Pilze wurden in Wäldern gesammelt.

Auch in diesem Fall musste die Frischmasse gemäß [Mes00] entnommenen Angaben errechnet werden:

$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Steinpilze}}$	=	$0,\!114$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Pfifferlinge}}$	=	$0,\!085$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Butterpilze}}$	=	$0,\!089$
$(\mathrm{TM}/\mathrm{FM})_{\mathrm{Rotkappe}}$	=	0,077.

Für Birkenpilze war kein Wert angegeben. Da diese Pilze wie auch Rotkappen zur Gattung *Leccinum* gehören, wurde der Wert für Rotkappen auch für Birkenpilze verwendet.

Pilze nehmen Nährstoffe nicht über Wurzeln, sondern über das so genannte *Pilzmycel* auf [CR03]. Das Mycel ist eine netzartige Struktur, die aus feinen Fäden, den so genannten *Hyphen* gebildet wird. Hyphen bestehen aus Cytoplasma, welches von einer Plasmamembran und einer Zellwand umgeben wird. Das Mycel lebt hauptsächlich unterirdisch sowohl in der organischen Auflage als auch im Mineralboden. Bei dem essbaren Teil der Pilze handelt es sich um den so genannten Fruchtkörper, der zur Reproduktion der Pilze dient und im Rahmen dieser Arbeit vermessen wurde.

Die in dieser Arbeit untersuchten Pilzarten sind so genannte *Mykorrhizapilze*, die in Symbiose mit Waldpflanzen, insbesondere Bäumen leben. Diese Pilze absorbieren Nährstoffe von einem anderen Organismus, können aber im Gegenzug Pflanzen entscheidend dabei helfen, Mineralstoffe aus dem Boden aufzunehmen [CR03] [Ste02].

Fruchtkörper von Pilzen sind dafür bekannt, Cäsium und Rubidium besonders anzureichern [Ste02]. Calcium und Strontium hingegen gelangen im Vergleich zu grünen Pflanzen nur in geringem Umfang in den Fruchtkörper. Über die Mechanismen der Aufnahme von

4 Spezifische Aktivitäten untersuchter Radionuklide in Nahrung und Böden

Radionukliden in Pilze ist nur sehr wenig bekannt, in [Hei92] wird in dem Zusammenhang jedoch darauf hingewiesen, dass die Gattung oder Art der Pilze dabei eine größere Rolle spielt, als beispielsweise Bodeneigenschaften. Allgemein kann festgehalten werden, dass der Transfer von Radionukliden vom Boden in den Fruchtkörper von Pilzen für symbiotische Arten wesentlich größer ist als für *Saprophyten*, die keine Symbiose mit Pflanzen eingehen [Hei92] [Ste02].

Auch im Rahmen dieser Arbeit wurden die höchsten spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Pilzen gemessen (Tabelle 4.21). Besonders hervorzuheben sind dabei die Butterpilze, gefolgt von den Birkenpilzen. Die für diese Pilzarten gemessen ¹³⁷Cs-Gehalte stimmen etwa mit den in [Bot00] angegebenen Werten überein. Geringere Gehalte konnten für die übrigen Arten festgestellt werden, wobei für Steinpilze und Pfifferlinge auf die deutlich höheren Angaben aus [Bot00] hinzuweisen ist. Auch in [Hei92] werden Pilze der Gattung *Suillus* als im Vergleich zur Gattung *Boletus* höher kontaminiert genannt.

Wie auch schon bei den Beeren fällt die mit 7,7 sehr hohe geometrische Standardabweichung des zusammengefassten Datensatzes auf, mit den bereits erwähnten Implikationen für eine Modellierung der Ingestionsdosis. Die Annahme einer Lognormalverteilung ist gemäß der Verteilungstests für den Gesamtdatensatz dennoch nicht abzulehnen, allerdings weist der QQ-Plot (Abb. B.21) deutlich auf eine multimodale Verteilung hin.

Wie auch schon bei den Beeren ist zu bemerken, dass in [Bot00] deutlich geringere geometrische Standardabweichungen angegeben werden.

Tabelle 4.22 zeigt die spezifischen ⁴⁰K-Aktivitäten in Pilzen. Diese variieren, je nach Pilzart, etwa um einen Faktor 2. Die höchsten ⁴⁰K-Gehalte wurden dabei in Pfifferlingen gefunden. [BfS01] gibt für die ⁴⁰K-Gehalte in Pilzen einen relativ großen Bereich an, der die in dieser Arbeit gefunden Werte enthält. Für Steinpilze beträgt die Abweichung zu dem in [Hei92] genannten Wert nur etwa 10%, bei Butterpilzen immerhin ca. 50%.

Bezieht man die spezifischen Aktivitäten auf die Trockenmasse, so kann die Annahme einer Lognormalverteilung für den Gesamtdatensatz der Pilze nicht abgelehnt werden, legt man hingegen die Frischmasse zugrunde, schon. Dies verdeutlicht der QQ-Plot (Abb. B.22), der auf eine multimodale Verteilung hinweist.

Auch für die Pilze lagen Proben zugehöriger organischer Auflagen vor (Tabelle 4.23). Die unterschiedlichen Werte von N für ¹³⁷Cs und ⁴⁰K bei gleichem Probenmaterial wurden bereits im Abschnitt über die Beeren begründet. In diesem Fall entspricht die Reihenfolge der Gehalte für die unterschiedlichen Pilzarten nicht den Beobachtungen für die Fruchtkörper. So zeigen beispielsweise die organischen Auflagen unter Steinpilzen die höchsten ¹³⁷Cs-Gehalte, wohingegen die höchsten ⁴⁰K-Gehalte in organischen Auflagen unter Butterpilzen zu finden sind.

Auffällig ist desweiteren die sehr hohe geometrische Standardabweichung von 8,3 für die organischen Auflagen unter Birkenpilzen. Verantwortlich dafür ist der außergewöhnlich niedrige Messwert für Probe Nr. 704 (siehe Tabelle B.2). Ohne diesen Wert, d. h. bei ausschließlicher Berücksichtigung der beiden Proben 705 und 706 ergäbe sich eine geometrische Standardabweichung von 1,6.

Material	N	Bez.	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinp.	9	TM	48060	65810	23626	29661	2,5	44852	J	$0,\!85$
		\mathbf{FM}	5479	7502	2693	3381	2,5	5113	J	$0,\!85$
[Bot00]	50	TM	Bereich: 8	8000–1400	000	170000	1,6			
Pfifferl.	8	TM	19786	24403	10102	10331	3,6	23281	J	$0,\!99$
		\mathbf{FM}	1682	2074	859	878	3,6	1979	J	$0,\!99$
[Bot00]	5	TM	Bereich: 1	15 000-43	3 000	$314\ 000$	2,0			
Butterp.	8	TM	1043589	820223	850509	759709	2,6	1219309	J	$0,\!85$
		\mathbf{FM}	92879	73000	75695	67614	2,6	108519	J	$0,\!85$
[Bot00]	1	TM	1 120 000							
Birkenp.	3	TM	271016	262943	257044	128698	6,5	752433	J	
		\mathbf{FM}	20868	20247	19792	9910	6,5	57937	J	
[Bot00]	$\widetilde{\gamma}$	TM	Bereich: 2	27 000–1 15	60 000	182000	2,0			
Rotkappe	3	TM	36671	30038	53677	17970	6,7	110543	Ν	
		\mathbf{FM}	2824	2313	4133	1384	6,7	8512	J	
[Bot00]	5	TM	Bereich: 1	5 000-128	000	30 200	1,3			
Alle	31	TM	318148	597534	30019	57289	7,7	466027	J	0,97
		$\mathbf{F}\mathbf{M}$	28286	53055	3422	5264	7,7	42323	J	$0,\!97$

Tabelle 4.21: Spezifische 137 Cs-Aktivitäten in Pilzen. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

Tabelle 4.22: Spezifische 40 K-Aktivitäten in Pilzen. Alle Angaben in Bq kg $^{-1}$.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinpilze	9	TM	796	167	756	780	1,2	799	J	0,96
		\mathbf{FM}	91	19	86	89	1,2	91	J	$0,\!96$
[Hei 92]		FM						104		
Pfifferlinge	8	TM	1392	88	1391	1390	1,1	1393	J	0,97
		\mathbf{FM}	118,3	7,5	118,2	118,1	1,1	$118,\!4$	J	$0,\!97$
Butterpilze	8	TM	733	116	742	724	1,2	734	J	0,96
		\mathbf{FM}	65	10	66	65	1,2	65	J	0,96
[Hei 92]		FM						122		
Birkenpilze	3	TM	1039	368	911	999	1,4	1058	J	
		\mathbf{FM}	80	28	70	77	1,4	82	J	
Rotkappe	3	TM	942	128	883	937	1,1	945	Ν	
		\mathbf{FM}	73	10	68	72	1,1	73	J	
Alle	31	TM	971	308	883	926	1,4	973	J	0,96
		\mathbf{FM}	89	25	82	85	$1,\!3$	89	Ν	$0,\!94$
[BfS01]		FM	Bereic	h: 8–2	33					

[Vah04b] 3 FM 53 22

OA zu	Nuklid	N	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinpilze	^{137}Cs	9	63916	82595	40740	29036	4,4	86658	J	$0,\!96$
	$^{40}\mathrm{K}$	4	55	13	51	53	1,3	55	J	
Pfifferlinge	$^{137}\mathrm{Cs}$	8	16829	23491	4442	7379	$_{3,9}$	18507	J	$0,\!86$
	$^{40}\mathrm{K}$	5	74	22	66	72	1,3	75	J	
Butterpilze	$^{137}\mathrm{Cs}$	8	58451	99880	23190	24260	$_{3,9}$	60855	J	$0,\!94$
	$^{40}\mathrm{K}$	8	92	46	81	85	1,5	92	J	$0,\!86$
Birkenpilze	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	17416	16634	17682	7310	8,3	69046	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	69	28	55	65	1,5	70	J	
Rotkappe	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	9516	8798	9008	5476	4,6	17684	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	80	10	78	80	1,1	80	J	
Alle	$^{137}\mathrm{Cs}$	31	40590	69631	17682	14494	4,7	47544	J	$0,\!98$
	$^{40}\mathrm{K}$	23	77	32	66	72	1,4	77	J	$0,\!93$

Tabelle 4.23: Spezifische Aktivitäten von 137 Cs und 40 K in Organischen Auflagen unter Pilzen. Alle Angaben in Bq kg⁻¹ und bezogen auf die Trockenmasse.

4.1.3 Bodenproben

Tabelle 4.25 bietet eine ausführliche Übersicht über die in Bodenproben gefunden Gehalte von $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}.$

In Bezug auf ¹³⁷Cs ist festzustellen, dass Waldböden unter Waldhimbeeren und Pilzen vergleichsweise hoch kontaminiert sind. Zudem liefern diese Datensätze relativ hohe Standardabweichungen. Waldböden unter Heidelbeeren, Walderdbeeren und Preiselbeeren zeigen geringere ¹³⁷Cs-Kontaminationen. Desweiteren konnten in Weide- und Wiesenböden höhere ¹³⁷Cs-Gehalte gefunden werden als in Böden unter Getreide oder Gemüse.

Besonders aufschlussreich ist der QQ-Plot für Weide- und Wiesenböden (Abb. B.23), da er besonders ausgeprägt auf eine multimodale Verteilung hindeutet. Dies entspricht der bereits geäußerten Vermutung, dass die Wiesen in der Umgebung Christinowkas unterschiedlich stark kontaminiert sind. Da zwar leider nicht alle, aber viele der Gras- und Wiesenbodenproben nach dem Probennahmeort in drei verschiedene Wiesen um Christinowka unterschieden werden konnten, ließ sich diese These erhärten (Tabelle 4.24). Sowohl die Messwerte für die Gras- als auch die Bodenproben lassen darauf schließen, dass "Wiese 2" am stärksten und "Wiese 1" am schwächsten kontaminiert wurde.

Die Kuhmilchproben konnten jedoch leider nicht nach den Weidegründen der Kühe unterschieden werden.

Die Abb. B.24 bzw. B.25 zeigen die QQ-Plots für die Datensätze der spezifischen Aktivitäten von ¹³⁷Cs bzw. ⁴⁰K aller Bodenproben. Für ¹³⁷Cs sind leichte "Schlangenlinien" um die Gerade y = z erkennbar, dennoch kann die Güte der Regression als gut bezeichnet werden und die Annahme einer Lognormalverteilung nicht abgelehnt werden.

Anders verhält es sich beim 40 K. In diesem Fall weist der QQ-Plot deutlich auf eine multimodale Verteilung hin. Zwar kann Tabelle 4.25 entnommen werden, dass insbesondere

Boden	N	AM	AS	GM	GS
Wiese 1	30	1597	415	1544	1,3
Wiese 2	9	9800	4092	9188	1,4
Wiese 3	14	7015	1382	6881	1,2
Gras	N	AM	AS	GM	GS
Gras Wiese 1	N 29	AM 242	AS 227	GM 175	GS 2,2
Gras Wiese 1 Wiese 2	N 29 8	AM 242 1852	AS 227 447	GM 175 1803	GS 2,2 1,3

Tabelle 4.24: Spezifische $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Aktivit}$ äten für unterschiedliche Wiesen um Christinowka. Alle Angaben in Bq kg^{-1} und bezogen auf die Trockenmasse.

die zu Waldbeeren und Pilzen gehörigen Bodenproben relativ wenig 40 K enthalten, eine genaue Interpretation fällt allerdings schwer, da keine Detailinformationen über den jeweils zugrunde liegenden Bodentyp der Bodenproben vorliegen. Bekannt ist lediglich, dass podsolische Lehmböden mit einer Humusschicht von 20 cm als typisch für die Umgebung Christinowkas angesehen werden können [Han03]. Desweiteren kann auch der sporadische Einsatz von kaliumhaltigem Dünger einzelner Bauern nicht ganz ausgeschlossen werden.

Zu bemerken ist, dass alle Messwerte für ⁴⁰K in den in Abschnitt 2.1.3 genannten Schwankungsbereich für den ⁴⁰K-Gehalt im Boden fallen. Für eine in Österreich unter Pilzen entnommene Bodenprobe wird in [Hei92] ein ⁴⁰K-Gehalt von 230 Bq kg⁻¹ (bezogen auf die Trockenmasse) genannt.

Boden zu	Nuklid	N	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Gras	$^{137}\mathrm{Cs}$	56	4376	3768	1881	3072	2,3	4422	Ν	0,90
	$^{40}\mathrm{K}$	58	348	93	326	338	$1,\!3$	348	J	$0,\!95$
Hafer	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	2637	2836	1408	1728	3,1	3295	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	275	64	238	270	1,2	277	Ν	
Mais	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	2218	2064	1311	1661	2,5	2534	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	279	42	297	276	1,2	280	J	
Roggen	$^{137}\mathrm{Cs}$	7	1558	1088	1420	1271	2,0	1620	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	7	287	55	305	282	1,2	289	J	
Weizen	$^{137}\mathrm{Cs}$	8	1373	1117	987	1159	1,7	1342	Ν	$0,\!84$
	$^{40}\mathrm{K}$	8	301	50	317	297	1,2	302	Ν	$0,\!84$
Getreide insgesamt	$^{137}\mathrm{Cs}$	21	1736	1497	1115	1332	2,0	1700	J	$0,\!92$
	$^{40}\mathrm{K}$	21	289	50	305	285	1,2	290	Ν	$0,\!88$
Kartoffeln	^{137}Cs	7	2891	2427	1270	2028	2,5	3130	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	7	274	59	250	269	1,2	275	J	
Möhren	$^{137}\mathrm{Cs}$	6	3256	2269	3113	2511	2,3	3542	J	
	^{40}K	6	294	47	294	291	1.2	295	J	

Tabelle 4.25: Spezifische Aktivitäten von $^{137}\rm{Cs}$ und $^{40}\rm{K}$ in Böden. Alle Angaben in Bq \rm{kg}^{-1} und bezogen auf die Trockenmasse.

Boden zu	Nuklid	N	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R_{\rm QQ}^2$
Rote Bete	$^{137}\mathrm{Cs}$	7	3165	2828	1523	2070	2,8	3537	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	7	284	51	311	280	1,2	285	J	
Wurzelgemüse	^{137}Cs	20	3096	2401	1552	2178	2,4	3253	Ν	$0,\!87$
insgesamt	$^{40}\mathrm{K}$	20	284	51	294	279	1,2	284	J	$0,\!93$
Kohl	^{137}Cs	7	2990	2700	1556	2055	2,6	3219	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	7	270	36	272	268	1,1	270	J	
Kopfsalat	^{137}Cs	2	881	12		881		881		
	$^{40}\mathrm{K}$	2	284	13		284		284		
Petersilie	^{137}Cs	1	1455	157						
	$^{40}\mathrm{K}$	1	324	32						
Sauerampfer	^{137}Cs	10	3986	5044	2306	2299	2,9	4053	J	$0,\!97$
	$^{40}\mathrm{K}$	9	248	93	246	233	1,5	251	J	$0,\!97$
Blattgemüse	^{137}Cs	20	3200	3927	1366	1963	2,6	3089	Ν	$0,\!89$
insgesamt	$^{40}\mathrm{K}$	19	264	68	274	254	$1,\!3$	265	J	$0,\!93$
Gurken	^{137}Cs	4	1705	1430	1198	1352	2,1	1806	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	5	310	38	305	308	1,1	310	J	
Erbsen	^{137}Cs	2	1721	934		1590	$1,\!8$	1872		
Erbsen	$^{40}\mathrm{K}$	2	335	14		335		335		
Tomaten	^{137}Cs	4	2262	1903	2056	1576	2,8	2714	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	6	309	65	296	304	1,2	310	J	
Gemüse insgesamt	^{137}Cs	46	3009	3057	1489	1996	2,5	2997	Ν	0,91
	$^{40}\mathrm{K}$	47	281	61	287	274	$1,\!3$	282	Ν	$0,\!94$
Tabak	^{137}Cs	5	2776	2499	1572	2049	2,4	2974	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	5	257	96	268	236	1,7	269	Ν	
Waldhimbeeren	^{137}Cs	8	12249	17124	5455	5277	5,2	20556	J	0,86
	$^{40}\mathrm{K}$	8	141	27	135	139	1,2	141	J	$0,\!94$
Haushimbeeren	^{137}Cs	1	2103	229						
	$^{40}\mathrm{K}$	2	296	50		294		298		
Heidelbeeren	^{137}Cs	10	1641	1167	1439	1105	3,1	2093	Ν	$0,\!85$
	$^{40}\mathrm{K}$	11	71	23	71	67	1,4	71	J	0,96
Walderdbeeren	^{137}Cs	3	2332	1923	1656	1842	2,3	2633	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	119	50	95	113	1,5	122	J	
Hauserdbeeren	^{137}Cs	2	1862	729		1789	1,5	1939		
	$^{40}\mathrm{K}$	2	186	176		138	3,1	266		
Preiselbeeren	^{137}Cs	1	1140	57						
	$^{40}\mathrm{K}$	1	$70,\!6$	5,0						
Beeren insgesamt	^{137}Cs	25	5135	10547	2103	2069	$_{3,8}$	5122	J	$0,\!96$
	$^{40}\mathrm{K}$	27	122	76	103	104	$1,\!8$	122	J	$0,\!98$
Steinpilze	^{137}Cs	7	3764	3067	2701	3032	$2,\!0$	3837	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	8	111	41	118	105	1,4	112	J	$0,\!91$
Pfifferlinge	^{137}Cs	7	1680	1706	654	942	$_{3,4}$	1999	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	7	120	31	117	117	1,3	121	J	
Butterpilze	$^{137}\mathrm{Cs}$	8	7511	5517	7598	5022	$_{3,0}$	9333	J	$0,\!89$

Boden zu	Nuklid	N	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R_{\rm QQ}^2$
Butterpilze	$^{40}\mathrm{K}$	8	97	13	101	96	1,1	97	J	0,92
Birkenpilze	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	7550	10283	2696	3138	5,7	14478	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	81	21	74	79	$1,\!3$	82	J	
Rotkappe	$^{137}\mathrm{Cs}$	3	3796	4341	2599	1588	7,3	11347	J	
	$^{40}\mathrm{K}$	3	84	10	87	84	1,1	84	J	
Pilze insgesamt	$^{137}\mathrm{Cs}$	28	4723	5078	2698	2449	3,7	5750	J	0,96
	$^{40}\mathrm{K}$	29	104	30	105	100	$1,\!3$	103	J	$0,\!97$
Alle Böden	$^{137}\mathrm{Cs}$	185	3776	5129	1829	2756	2,8	3773	J	0,98
	$^{40}\mathrm{K}$	192	253	118	274	219	$1,\!8$	261	Ν	$0,\!89$

4.2 Natürliche Radionuklide

4.2.1 Organische Proben

15 organische Proben (siehe auch Tabelle B.1) wurden nach einer ersten gammaspektrometrischen Messung und Auswertung auf ¹³⁷Cs- und ⁴⁰K-Gehalte mit deutlich verlängerten Messzeiten erneut vermessen, in der Hoffnung auch natürliche Radionuklide der diskutierten Zerfallsreihen auswerten zu können:

	Anzahl erneut
Probenmaterial	untersuchter Proben
Erbsen	1
Gras	3
Hafer	3
Hauserdbeeren	2
Kartoffeln	2
Körniger Frischkäse	1
Rote Bete	1
Schwein (Niere)	1
Weizen	1

Die Messzeiten betrugen dabei drei bis fünf Tage. Ausgewählt wurden Proben mit besonders niedrigen ¹³⁷Cs-Gehalten, da in hoch kontaminierten Proben der Compton-Untergrund eine Auswertung der Zerfallsreihennuklide sicher verhindert hätte.

Leider lagen jedoch auch bei den untersuchten Proben nur sehr vereinzelt die primären Messergebnisse der spezifischen Aktivität für eine Linie der interessierenden Nuklide über der Nachweisgrenze, so dass eine detaillierte Auswertung nicht möglich war. Um dies zu realisieren, wäre mehr Probenmaterial notwendig gewesen, um beispielsweise über die Veraschung eine bessere Aufkonzentrierung als mit der Trocknung zu erreichen oder die höheren Nachweiswahrscheinlichkeiten der Marinelli-Geometrie ausnutzen zu können. Eine Veraschung der vorliegenden Proben war nicht möglich, da zu erwarten war, dass zu wenig Material für eine geeignete Messgeometrie übrig geblieben wäre.

4.2.2 Bodenproben

Neben den 15 Proben organischen Materials wurden auch 32 Bodenproben mit deutlich erhöhten Messzeiten erneut vermessen. Diese Proben konnten auf die spezifischen Aktivitäten der Nuklide ²²⁶Ra, ²²⁸Ra und ²²⁸Th ausgewertet werden.⁴ Dabei lagen alle primären Messergebnisse über der jeweiligen Nachweisgrenze. Tabelle B.3 auf Seite 175 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse. Eine Auswertung des Nuklids ²³⁵U war leider nicht zuverlässig möglich.

Tabelle 4.26 gibt eine Übersicht über die statistischen Kenndaten des zusammengefassten Datensatzes aller Bodenproben. Mit "Min' bzw. "Max' sind dabei die jeweils niedrigsten bzw. höchsten gemessenen spezifischen Aktivitäten gekennzeichnet.

Das Verhältnis der spezifischen Aktivitäten von 226 Ra und 224 Ra kann als Indikator für eine anthropogene Beeinflussung dieser Gehalte herangezogen werden. So wird in [Beu99] der Wert 1,4±0,3 als repräsentativ für den geogenen Untergrund genannt. Die im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Werte entsprechen diesem sehr gut.

Die in Tabelle 4.26 angegebenen Werte für 235 U wurden mit Hilfe des bereits erwähnten, natürlichen Aktivitätsverhältnisses von 238 U zu 235 U von etwa 21,7 aus den Messwerten für 226 Ra geschätzt, wobei ein säkulares Gleichgewicht zwischen 238 U und 226 Ra angenommen wurde.

	226 Ra	$^{235}\mathrm{U}$	$^{228}\mathrm{Ra}$	224 Ra	226 Ra/ 224 Ra
AM	$15,\!4$	$0,\!7$	$13,\!4$	$13,\!0$	1,2
AS	7,5	$0,\!3$	6,7	6,8	0,2
ME	16,5	$0,\!8$	$14,\! 0$	13,7	
GM	$13,\!5$	$0,\!6$	$11,\!5$	$11,\! 0$	
GS	1,7	1,7	$1,\!8$	$1,\!9$	
\mathbf{EW}	$15,\!8$	0,7	$13,\!8$	$13,\!4$	
Min	4,8	$_{0,2}$	3,0	3,0	$1,\!0$
Max	37,5	1,7	$_{30,2}$	$30,\!6$	1,7

Tabelle 4.26: Daten des Gesamt datensatzes der Bodenproben für untersuchte Zerfallsreihennuklide. Ang aben der ersten vier Spalten in Bq kg⁻¹.

Vergleicht man die angegebenen Werte mit Daten aus [Har04] für in Niedersachsen entnommene Bodenproben⁵ (Tabelle 4.27), so kann festgestellt werden, dass nicht von erhöhten

⁴Die Aktivität des ²²⁸Th entspricht aufgrund eines säkularen Gleichgewichtszustandes der Aktivität des ²²⁴Ra.

⁵Dabei handelt es sich genau wie bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Proben um solche aus der obersten Bodenschicht.

Aktivitätskonzentrationen der untersuchten Zerfallsreihennuklide in den in dieser Arbeit dahingehend vermessenen Bodenproben gesprochen werden kann.

	226 Ra	$^{235}\mathrm{U}$	228 Ra	224 Ra
AM	28	$1,\!3$	28	27
AS	10	$0,\!6$	11	10
Min	11	0,5	9	10
Max	66	$_{3,2}$	76	69

Tabelle 4.27: [Har04] ent
nommene Daten zu niedersächsischen Böden. Alle Angaben i
n ${\rm Bq}~{\rm kg}^{-1}.$

4.3 Zusammenfassung

- Die Annahme einer Lognormalverteilung der spezifischen Aktivität von ¹³⁷Cs bzw. ⁴⁰K in den untersuchten Probenmaterialien konnte in vielen Fällen nicht abgelehnt werden. Ausnahmen davon traten in Bezug auf ¹³⁷Cs insbesondere dann auf, wenn mehrere Teilgesamtheiten zu einem Datensatz zusammengefasst wurden, was sich auch in relativ großen geometrischen Standardabweichungen niederschlägt. Dies spielt vor allen Dingen eine Rolle, wenn Proben aus Wäldern berücksichtigt werden (Beeren, Pilze, Wildschweine).
- Mit einem Wert von bis zu etwa 3 relativ geringe geometrische Standardabweichungen zeigen die zusammengefassten Datensätze der ¹³⁷Cs-Gehalte in Milch, Fischen, Getreide, Wurzelgemüse, Blattgemüse, Gemüse insgesamt und Böden. Dennoch können den QQ-Plots auch in manchen dieser Fälle Hinweise auf mehrere zugrunde liegende Teilgesamtheiten entnommen werden.
- ¹³⁷Cs-Gehalte in Kuhmilch- und Grasproben liefern Hinweise auf unterschiedlich kontaminierte Weidegründe. Diese Vermutung soll auch im folgenden Kapitel anhand der Transferfaktoren thematisiert werden.
- Die $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Gehalte}$ zeigen in der Regel wesentlich größere Schwankungsbreiten als die $^{40}\mathrm{K}\text{-}\mathrm{Gehalte}.$
- Vergleichsweise hohe ¹³⁷Cs-Gehalte in organischen Proben zeigen sich in Waldbeeren, Pilzen, den zugehörigen organischen Auflagen und Organen von Waldtieren. Relativ niedrige spezifische ¹³⁷Cs-Aktivitäten konnten dagegen in Getreideproben und einigen Proben von Hausschweinen gefunden werden.
- Die höchsten ⁴⁰K-Gehalte wurden für Gemüseproben festgestellt.
- Bei den Böden wurden die höchsten spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten für Waldböden gemessen. Die ⁴⁰K-Gehalte dieser Böden waren allerdings geringer als die von Bodenproben, die außerhalb der Wälder entnommen wurden.
- Bei organischen Proben war es trotz Messzeiten von mehreren Tagen nicht möglich, außer 40 K noch andere natürliche Radionuklide sinnvoll auszuwerten.
- Für 32 Bodenproben konnten die Gehalte dreier Radiumisotope bestimmt werden. Die gemessenen Werte lassen nicht auf eine diesbezügliche anthropogene Beeinflussung schliessen.

5 Transfer von Cäsium-137 und Kalium-40

5.1 Monte-Carlo-Simulationen

5.1.1 Vorbemerkungen

In diesem Kapitel sollen, sofern möglich, Transferfaktoren für den Transport von 137 Cs und 40 K in Nahrungsmittel bestimmt werden. Zum überwiegenden Teil konnten dazu zueinander gehörige Proben, wie z. B. eine Pflanzen- und eine Bodenprobe, direkt miteinander verglichen werden. Für Milch und Fleisch war dies nicht möglich. In diesen Fällen mussten Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden.

Für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen wurde das Excel-Plug-In *Crystal Ball 2000* verwendet. Die Zufallszahlen der Monte-Carlo-Simulation wurden dabei stets mit der Methode des so genannten *Latin hypercube sampling* erzeugt. Dabei wird eine angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Größe in eine bestimmte Anzahl disjunkter Intervalle gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dabei stets 500 Intervalle gewählt. Für jedes Intervall wird dann gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb des Intervalls eine Zufallszahl erzeugt. Der Datensatz dieser Zufallszahlen stellt dann das so genannte *Latin hypercupe sample* dar. Dieses Verfahren bietet gegenüber der herkömmlichen Monte-Carlo-Methode den Vorteil, dass es die angenommene Verteilung auf eine "gleichmäßigere" und damit letztlich auch genauere Art und Weise beschreibt. Dadurch wird eine geringere Anzahl an Versuchen zum Erreichen vergleichbarer Genauigkeit benötigt, allerdings zu Lasten des erforderlichen Speicherplatzes und damit unter Umständen auch der Rechenzeit. Für die Simulationen dieser Arbeit wurden stets 100 000 Versuche zur Beschreibung einer Verteilung gewählt.

Alle in diesem Kapitel verwendeten Abkürzungen entsprechen denen vorangeganger Kapitel, sofern sie nicht neu definiert werden.

5.1.2 Milch

Der Transfer sowohl in Kuh- als auch in Ziegenmilch wurde anhand des folgenden Modells untersucht:

$$\mathcal{T} = \frac{\mathcal{A}_M}{\sum_i V_i \mathcal{A}_i} = \frac{\mathcal{A}_M}{V \sum_i v_i \mathcal{A}_i},\tag{5.1}$$

wobei \mathcal{A}_M die spezifische Aktivität des untersuchten Radionuklids in Milch ist und der Index *i* die Nahrungsbestandteile der Tiere nummeriert. \mathcal{A}_i ist die auf die Trockenmasse bezogene spezifische Aktivität des Nuklids in der jeweiligen Futterkomponente, *V* die Gesamtverzehrsmenge pro Zeiteinheit und $v_i = V_i/V$ der Anteil der *i*-ten Komponente zum Gesamtverzehr.

Da sowohl Kühe als auch Ziegen aus der beprobten Gegend in etwa die Zeit von Mai bis November, d. h. pro Jahr sieben Monate, auf der Weide und den Rest der Zeit im Stall verbringen [Rom04a], wurden Gras und Heu mit

$$v_{\rm Gras} = 7/12$$
 und $v_{\rm Heu} = 5/12$

als Futterkomponenten angenommen. Zwar tragen insbesondere in der Zeit von August bis November auch Mais, Erbsen, Getreide und Futterrüben zur Gesamtverzehrsmenge der Kühe bei [Rom04a], konnten aber mangels detaillierterer Informationen nicht berücksichtigt werden.

Für die Gesamtverzehrsmenge V wurden [TRS94] die folgenden auf die Trockenmasse bezogenen Daten entnommen (alle Angaben in kg d^{-1}):

	EW	Bereich
Milchkühe	16,1	10 - 25
Milchziegen	$1,\!3$	$1,\!0\!-\!3,\!5$

Für die Monte-Carlo-Simulationen wurde als Verteilung in beiden Fällen eine Dreiecksverteilung mit dem Erwartungswert als wahrscheinlichstem Wert angenommen. Die Aufnahme von Wasser konnte nicht berücksichtigt werden, da keine Wasserproben vorlagen.

Die weiteren Eingabewerte der Simulationen sind in Tabelle 5.1 aufgelistet und entstammen den Tabellen 4.1, 4.2, 4.7 und 4.8, wobei in allen Fällen eine Lognormalverteilung angenommen wurde.

Tabelle 5.1: Spezifische Aktivitäten für Monte-Carlo-Simulationen zum Transfer in Milch. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

		$^{137}\mathrm{Cs}$		40	K
Material	Bezug	GM	GS	GM	GS
Gras	TM	339	$_{3,0}$	586	1,4
Heu	TM	283	3,4	497	1,4
Kuh-	FM	31	2,5	48	$1,\!2$
milch	TM	246	2,5	385	1,2
Ziegen-	FM	14	$1,\!6$	42	1,3
milch	TM	109	1,6	336	1,3

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Simulationen und Literaturangaben geben die Tabellen 5.2 und 5.3. Bei auf Trocken- bzw. Frischmasse bezogenen Transferfaktoren handelt
es sich um solche, bei denen sich die spezifische Aktivität der Milch auf die jeweilige Masse bezieht. Als Erwartungswert für die aus der Simulation resultierende Verteilung wurde angesichts der mit 100 000 großen Anzahl an Versuchen der arithmetische Mittelwert angenommen. ,VB' bezeichnet den Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 %.

Nuklid	Bezug	GM	GS	ME	EW	VB	p-Wert
^{137}Cs	TM	0,036	3,6	0,036	0,081	0,003-0,44	0,84
	\mathbf{FM}	0,004	3,6	0,004	0,010	< 0,001 – 0,054	$0,\!12$
[TRS94]	FM				0,008	Bereich: 0,001-	-0,027
[BS95]	FM				0,007	Bereich: 0,003-	0,016
[Han 03]	FM				0,010		
[AVV]	FM				0,005		
[MP93]	FM				0,003		
$^{40}\mathrm{K}$	TM	0,041	$1,\!4$	0,041	0,043	0,020-0,082	$0,\!54$
	\mathbf{FM}	0,005	1,4	0,005	0,005	0,003-0,010	0,92
[TRS94]	FM				0,007		
[AVV]	FM				0,006		
[Vah04b]	FM	0,008	1,3		0,008	0,005-0,014	

Tabelle 5.2: Transferfaktoren für Kuhmilch. Auf die Trockenmasse bezogene Angaben in d $\rm kg^{-1},$ sonst in d $\rm l^{-1}.$

Tabelle 5.3: Transferfaktoren für Ziegenmilch. Auf die Trockenmasse bezogene Angaben in d $\rm kg^{-1},$ sonst in d $\rm l^{-1}.$

Nuklid	Bezug	GM	GS	ME	\mathbf{EW}	VB	$p ext{-Wert}$
^{137}Cs	TM	0,14	2,8	0,14	0,24	$0,\!02\!\!-\!\!1,\!05$	< 0,01
	\mathbf{FM}	0,018	2,8	0,018	0,030	$0,\!002\!-\!0,\!13$	$< 0,\!01$
[TRS94]	FM				0,10	Bereich: 0,00	09–0,47
[MP93]	FM				0,06		
⁴⁰ K	TM	0,32	$1,\!6$	0,32	0,36	$0,\!13\!-\!0,\!78$	< 0,01
	\mathbf{FM}	0,040	1,6	$0,\!040$	$0,\!044$	$0,\!016\!-\!0,\!097$	$< 0,\!01$

Mit Crystal Ball wurden die modellierten Verteilungen durch theoretische Verteilungen gefittet. In allen Fällen stellte eine Lognormalverteilung den besten Fit dar. Der angegebene geometrische Mittelwert und die geometrische Standardabweichung beziehen sich hier und im Folgenden stets auf diese gefittete Verteilung. Der aufgeführte *p*-Wert ist dabei analog zu Abschnitt 3.4.2 für den χ^2 -Anpassungstest und die Nullhypothese, dass eine Lognormalverteilung vorliegt, definiert.

Wie aus Tabelle 5.2 ersichtlich, kann für die Kuhmilch sowohl im Falle des ¹³⁷Cs als auch des ⁴⁰K von einer guten Übereinstimmung mit den Literaturwerten gesprochen werden. Bemerkenswert ist der Vergleich mit der Angabe aus [Han03], die sich ebenfalls auf Kühe aus Christinowka bezieht und dem im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Wert entspricht.

Der Wert des Medians, der, in Bezug auf die angegebene Genauigkeit, stets mit dem

5 Transfer von Cäsium-137 und Kalium-40

geometrischen Mittelwert der gefitteten Lognormalverteilung übereinstimmt, und der *p*-Wert des Anpassungstests zeigen, dass die Annahme einer Lognormalverteilung für die modellierten Verteilungen nicht abgelehnt werden kann. Abb. 5.1 zeigt exemplarisch die aus der Monte-Carlo-Simulation erhaltene Verteilung für den auf die Frischmasse der Milch bezogenen Transferfaktor von ¹³⁷Cs in Kuhmilch. Die entsprechende Verteilung für ⁴⁰K ist in Abb. 5.2 zu sehen.

Die im Vergleich zu ⁴⁰K sowohl für Kuh- als auch für Ziegenmilch wesentlich höheren Werte der geometrischen Standardabweichung des Transferfaktors für ¹³⁷Cs spiegeln die im Vergleich zu ⁴⁰K höhere Variabilität der ¹³⁷Cs-Gehalte in den Kompartimenten wider.

Für den Transfer von ⁴⁰K in Ziegenmilch konnten keine Literaturangaben gefunden werden. Für ¹³⁷Cs werden in [TRS94] und [MP93] für diesen Fall Transferfaktoren angegeben, die um eine bis drei Größenordnungen über dem für Kuhmilch liegen. Zwar konnte auch im Rahmen dieser Arbeit im Vergleich zur Kuhmilch ein höherer Transferfaktor für Ziegenmilch gefunden werden, allerdings bleibt der zugehörige Erwartungswert bis zu einem Faktor 3 unter den Literaturwerten. Einschränkend ist dabei darauf hinzuweisen, dass die hier getätigte Annahme der Verteilung für die spezifische Aktivität in Ziegenmilch lediglich auf vier vermessenen Proben beruht. Zudem wird in [TRS94] eine relativ große Schwankungsbreite für diesen Transferfaktor genannt.

Wie anhand der *p*-Werte zu erkennen ist, entsprechen die simulierten Verteilungen für Ziegenmilch weniger gut einer Lognormalverteilung als die für Kuhmilch.



Abbildung 5.1: Verteilung des Transferfaktors für ¹³⁷Cs in Kuhmilch (bezogen auf die Frischmasse). Der rot eingefärbte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 %.



Abbildung 5.2: Verteilung des Transferfaktors für ⁴⁰K in Kuhmilch (bezogen auf die Frischmasse). Der rot eingefärbte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 %.

5.1.3 Schweinefleisch

Analog zu der Vorgehensweise für Milch wurde der Transfer von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K in das Muskelfleisch von Hausschweinen simuliert. In [TRS94] werden Getreide, Mais, Kartoffeln, Molke und Soja als Futterkomponenten von Hausschweinen aufgeführt. Da weitere Informationen nicht zur Verfügung standen und Molke und Soja nicht vermessen wurden, wurden Getreide (inkl. Mais) und Kartoffeln als alleinige Futterkomponenten angenommen, mit

 $v_{\text{Getreide}} = v_{\text{Kartoffeln}} = 0.5.$

Für Schweine mit einem Körpergewicht von 110 kg wird in [TRS94] ein Erwartungswert für die auf die Trockenmasse bezogene Gesamtverzehrsmenge von 2,4 kg d⁻¹ genannt. Die Schwankungsbreite wird mit 2,0–3,0 kg d⁻¹ angegeben. Wie auch schon bei der Milch, wurde auch in diesem Fall von einer Dreiecksverteilung ausgegangen.

Tabelle 5.4 nennt die weiteren Eingabewerte für die Monte-Carlo-Simulationen (siehe Tabellen 4.5 und 4.9–4.12). Für alle diese Größen wurde dabei eine Lognormalverteilung angenommen.

Die Ergebnisse der Simulationen können Tabelle 5.5 entnommen werden. In beiden Fällen wurde eine Lognormalverteilung als bester Fit ausgegeben, wenn auch jeweils mit einem p-Wert von < 0.01.

5 Transfer von Cäsium-137 und Kalium-40

		137	Cs	$^{40}\mathrm{K}$		
Material	Bezug	GM	GS	GM	GS	
Schwein (Muskel)	\mathbf{FM}	34	$1,\!9$	98	1,5	
Getreide	TM	11,2	2,2	153	1,1	
Kartoffeln	TM	40	2,0	850	1,1	

Tabelle 5.4: Spezifische Aktivitäten für Monte-Carlo-Simulationen zum Transfer in Muskelfleisch von Hausschweinen. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Für ¹³⁷Cs liegt der Erwartungswert in derselben Größenordnung wie die Literaturangaben und in der in [TRS94] genannten Schwankungsbreite. Für ⁴⁰K wurde ein um etwa den Faktor 3 geringerer Erwartungswert ermittelt als in Monte-Carlo-Simulationen, die für niedersächsische Hausschweine im Rahmen von [Vah04b] durchgeführt wurden. Auch wird ebenda eine größere Schwankungsbreite des Transferfaktors angegeben. Die Aussagekraft der hier vorgestellten Ergebnisse ist jedoch angesichts der relativ geringen Anzahl von sechs vermessenen Schweinemuskelproben und der bereits diskutierten Problematik der Zusammensetzung des Schweinefutters, recht limitiert.

Tabelle 5.5: Transferfaktoren für Schweinefleisch. Alle Angaben in d kg^{-1} .

Nuklid	Bezug	GM	GS	ME	\mathbf{EW}	VB	$p ext{-Wert}$
^{137}Cs	\mathbf{FM}	0,52	2,3	$0,\!53$	0,73	$0,\!10\!-\!2,\!56$	$< 0,\!01$
[TRS94]	FM				0,24	Bereich: 0,	03 - 1, 1
[MP93]	FM				0,40		
40 K	\mathbf{FM}	0,08	1,5	$0,\!09$	$0,\!09$	$0,\!04\!-\!0,\!18$	$< 0,\!01$
[Vah04b]	FM	0,20	2,7		0,32	0,03–1,37	

5.2 Direkte Vergleiche

5.2.1 Vorbemerkungen

Zur Untersuchung der Radionuklidaufnahme vom Boden in Pflanzen, und weiter unten auch vom Boden in Pilze sowie von organischen Auflagen in Beeren und Pilze, wurden zueinander gehörige Probenpaare miteinander verglichen und die Konzentrationsverhältnisse für ¹³⁷Cs und ⁴⁰K berechnet. Die einzelnen Werte können Tabelle B.15 ab Seite 181 entnommen werden. Die Datensätze an Boden-Bewuchs- bzw. Organische Auflage-Bewuchs-Transferfaktoren für bestimmte Konstellationen zweier Kompartimente wurden statistisch ausgewertet und auf das Vorliegen einer Lognormalverteilung getestet.

Die spezifische Aktivität des Ausgangsmaterials, d. h. des Bodens oder der organischen Auflage, wurde in diesen Betrachtungen stets auf die Trockenmasse bezogen. Dies trifft ebenfalls auf alle in diesem Kapitel genannten Literaturangaben zu. Die spezifische Aktivität der Pflanzen, Früchte oder Pilze wurde zu Vergleichszwecken sowohl auf die Trocken- als auch auf die Frischmasse bezogen. Die Zerfallskorrektur für die spezifsche ¹³⁷Cs-Aktivität bezieht sich in allen Fällen dabei nicht auf den 01.01.2003, sondern auf das jeweilige Probennahmedatum der Probe.

Wie bereits erwähnt, lagen bodenkundliche Informationen zum untersuchten Bodenmaterial nicht vor. In Abschnitt 4.1.3 wurde zudem auf eine Angabe in [Han03] hingewiesen, die für die Gegend um Christinowka Lehmböden als typisch nennt. Desweiteren werden ebenda für Böden von einer Wiese und einem Flussufer bei Christinowka pH-Werte von 6,9–7,6 angegeben. Diese Werte sind vergleichsweise hoch. So werden in derselben Arbeit für Böden aus den ukrainischen Orten Nosdrischtsche und Nove Scharno pH-Werte von 4,1–6,8 genannt. Gemäß Abschnitt 2.1.4 sind daher eine hohe Fixierung des ¹³⁷Cs in Böden um Christinowka und ein dementsprechend geringer Transfer in den Bewuchs zu erwarten. Von Interesse ist dies insbesondere für den Vergleich mit Angaben aus [TRS94], da dort für einige Probenmaterialien Transferfaktoren in Abhängigkeit des Bodentyps genannt werden, wobei drei verschiedene Bodentypen Berücksichtigung finden. Zur Unterscheidung sollen bei der Angabe dieser Literaturstelle folgende Abkürzungen verwendet werden:

Abkürzung	Bodentyp	pH-Wert
[TRS94]-TL	Ton, Lehm	6
[TRS94]-S	Sand	5
[TRS94]-T	Torf	4

5.2.2 Getreide

Es lagen zueinander gehörige Getreide- und Bodenproben vor, die sich nicht auf einzelne Pflanzen, sondern unterschiedliche Anbaufelder beziehen (siehe Abschnitt 1.2). Die Tabellen 5.6 und 5.7 zeigen die Resultate für die zusammengefassten Datensätze.

Für ¹³⁷Cs kann für den Datensatz aller Getreideproben von einer guten Übereinstimmung insbesondere zu den Angaben aus [TRS94] und [BS95] gesprochen werden, wobei der Vergleich mit erstgenannter Quelle die bereits zitierte Aussage, dass es sich bei den untersuchten Böden vermutlich um tonig-lehmige Böden mit relativ hohen pH-Werten handelt, zu bestätigen scheint.

Die höchsten Transferfaktoren für ¹³⁷Cs wurden für Hafer und Roggen gefunden. Dies entspricht den Feststellungen in Bezug auf die ¹³⁷Cs-Gehalte (Tabelle 4.9). Mais zeigte die niedrigsten Transferfaktoren für ¹³⁷Cs, obwohl keine geringeren ¹³⁷Cs-Gehalte als in Weizen gefunden wurden. In Tabelle 4.25 zeigten sich jedoch im Vergleich zu Weizen höhere ¹³⁷Cs-Gehalte in Böden unter Mais.

Die Annahme einer Lognormalverteilung für den zusammengefassten Datensatz der ¹³⁷Cs-Transferfaktoren für alle Getreidesorten kann nicht abgelehnt werden. Dies bestätigt auch der QQ-Plot (Abb. B.26 auf Seite 196), in dem sich nur eine leichte Linkssteilheit manifestiert.

Für 40 K liegen die Transferfaktoren aller Getreidesorten sehr nahe beieinander. Die geometrischen Standardabweichungen liegen ähnlich niedrig wie bereits für die 40 K-Gehalte

5 Transfer von Cäsium-137 und Kalium-40

festgestellt. Der in [Vah04b] angegebene Transferfaktor für auf die Frischmasse bezogenes Getreidekorn liegt in derselben Größenordnung wie die hier vorgestellten Werte. In [Vah04b] wurde allerdings bei einer Unterscheidung in die einzelnen Getreidesorten ein etwa um den Faktor 4 höherer Transferfaktor für Roggen als für Weizen und Hafer gefunden. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht reproduziert werden.

Gemäß Shapiro-Wilk-Test kann für den Datensatz aller Getreideproben die Annahme einer Lognormalverteilung nicht abgelehnt werden.

Die Abb. 5.3 und 5.4 geben eine Übersicht über die Gehalte von $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}$ in Getreide sowie die jeweiligen Konzentrationsverhältnisse in Bezug auf die Bodenproben ("Transferfaktoren für Einzelproben") in Abhängigkeit der $^{137}\mathrm{Cs}$ - bzw. $^{40}\mathrm{K}$ -Gehalte im Boden unter Getreide.

Für 40 K zeigt sich weitestgehend eine Unabhängigkeit des Gehaltes in Getreide vom Gehalt im Boden. Dies resultiert in einem mit steigendem 40 K-Gehalt im Boden fallendem Transferfaktor und ist in der homöostatischen Kontrolle für Kalium begründet (siehe Abschnitte 2.1.3 und 2.2).

Für $^{137}\mathrm{Cs}$ ist eine relativ gesehen große Streuung für das Konzentrationsverhältnis fest-zustellen, welches aber unabhängig vom $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Gehalt}$ im Boden zu sein scheint. Daraus resultiert ein zu höheren $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Gehalten}$ im Boden steigender $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Gehalt}$ in den Getreidepflanzen.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Hafer	3	TM	0,021	0,020	$0,\!015$	0,016	2,7	0,026	J	
		\mathbf{FM}	0,019	$0,\!017$	$0,\!013$	$0,\!014$	2,7	0,022	J	
Mais	3	TM	0,0038	0,0006	0,0038	0,0037	1,2	0,0038	J	
		$_{\rm FM}$	0,0033	0,0006	0,0034	0,0033	1,2	0,0033	J	
[MP93]		FM						0,01		
Roggen	7	TM	0,014	0,005	0,016	0,012	1,7	0,014	J	
		$_{\rm FM}$	0,012	$0,\!005$	$0,\!014$	$0,\!011$	1,7	0,012	J	
Weizen	8	TM	0,007	0,003	0,007	0,007	1,5	0,007	J	0,93
		$_{\rm FM}$	0,006	0,002	0,006	0,006	1,5	0,006	J	$0,\!92$
Alle	21	TM	0,011	0,009	0,008	0,008	2,0	0,011	J	0,97
		\mathbf{FM}	0,009	0,008	0,007	0,007	2,0	0,009	J	$0,\!97$
Getreidekorn:										
[TRS94]-TL	220	TM				<i>EW</i> : 0,	01 (V.	B: 0,001-	0,1)	
[TRS94]-S	132	TM				EW: 0,	026 (V	VB: 0,002	26-0,26	<i>5)</i>
[TRS94]-T	14	TM				EW: 0,	083 (V	VB: 0,008	3-0,83	3)
[BS95]		FM						0,01		
Getreide:										
[MP93]		FM						0,02		

Tabelle 5.6: Transferfaktoren für 137 Cs in Getreide.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R_{\rm QQ}^2$
Hafer	3	TM	$0,\!61$	$0,\!07$	$0,\!63$	$0,\!60$	1,1	$0,\!61$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!53$	$0,\!06$	$0,\!55$	$0,\!53$	1,1	$0,\!53$	J	
Mais	3	TM	$0,\!53$	$0,\!04$	$0,\!55$	$0,\!53$	1,1	$0,\!53$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!47$	$0,\!04$	$0,\!48$	$0,\!46$	1,1	$0,\!47$	J	
Roggen	7	TM	$0,\!58$	$0,\!19$	$0,\!56$	$0,\!56$	1,3	$0,\!58$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!50$	$0,\!17$	$0,\!48$	$0,\!48$	1,3	$0,\!50$	Ν	
Weizen	8	TM	0,52	$0,\!13$	$0,\!50$	$0,\!50$	1,3	$0,\!52$	J	$0,\!97$
		\mathbf{FM}	$0,\!45$	$0,\!11$	$0,\!44$	$0,\!44$	$1,\!3$	$0,\!45$	J	0,96
Alle	21	TM	$0,\!55$	$0,\!14$	$0,\!54$	$0,\!54$	1,3	$0,\!55$	J	0,94
		\mathbf{FM}	$0,\!48$	$0,\!12$	$0,\!47$	$0,\!47$	$1,\!3$	$0,\!48$	J	$0,\!93$
Getreidekorn [Vah04b]	17	FM	0,38	0,27		0,30	2,0	0,38		0,95

Tabelle 5.7: Transferfaktoren für $^{40}\mathrm{K}$ in Getreide.





Abbildung 5.3: ¹³⁷Cs-Gehalt in Getreide und ¹³⁷Cs-Konzentrationsverhältnisse von Getreide zu zugehörigen Böden in Abhängigkeit vom ¹³⁷Cs-Gehalt in Boden unter Getreide.



Abbildung 5.4: ⁴⁰K-Gehalt in Getreide und ⁴⁰K-Konzentrationsverhältnisse von Getreide zu zugehörigen Böden in Abhängigkeit vom ⁴⁰K-Gehalt in Boden unter Getreide.

5.2.3 Gras

Die Tabelle 5.8 gibt eine Übersicht über die Transferfaktoren für den Transfer Boden-Gras.

Es zeigt sich wie auch schon für Getreide in Bezug auf 137 Cs eine gute Übereinstimmung mit den Angaben in [TRS94] für Ton- bzw. Lehmböden und [BS95]. Für 40 K liegen die Transferfaktoren in derselben Größenordnung wie im Rahmen von [Vah04b] ermittelt.

Die Annahme einer Lognormalverteilung kann sowohl für ¹³⁷Cs als auch für ⁴⁰K nicht abgelehnt werden. Abb. B.27 auf Seite 196 zeigt den QQ-Plot für ⁴⁰K (bezogen auf die Trockenmasse). Aufgrund konstanter Umrechnungsfaktoren zeigen die QQ-Plots für die Trocken- bzw. Frischmasse identische Charakteristika.

Die Abb. 5.5 und 5.6 zeigen die Gehalte von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K in Gras sowie die jeweiligen Konzentrationsverhältnisse in Bezug auf die Bodenproben in Abhängigkeit der ¹³⁷Csbzw. ⁴⁰K-Gehalte im Weideboden, wobei ganz ähnliche Charakteristika wie bereits für Getreide erläutert, beobachtet werden können. Zusätzlich zeigt sich eine Aufspaltung der ¹³⁷Cs-Gehalte in Weideböden in mindestens zwei Intervalle, was bereits in Abschnitt 4.1.2 diskutiert wurde und auf unterschiedlich mit ¹³⁷Cs kontaminierte Weidegründe hinweist. Dieser Effekt ist für die zugehörigen ¹³⁷Cs-Gehalte in Gras in dieser Darstellung weitaus weniger ausgeprägt sichtbar. Für ⁴⁰K konnte vergleichbares nicht beobachtet werden.

Nuklid	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R_{\rm QQ}^2$
^{137}Cs	54	TM	0,16	$0,\!17$	0,10	0,11	2,2	0,16	J	0,98
		\mathbf{FM}	0,024	0,026	0,016	0,017	2,2	0,024	J	$0,\!98$
[TRS94]-TL	246	TM					EW	0,11 (VB: 0,0	011–1,1)
[TRS94]-S	229	TM					EW	0,24 (VB: 0,0	024–2,4)
[TRS94]-T	21	TM					EW	0,53 (VB: 0,0	053–5,3)
[BS95]		FM						0,03		
[MP93]		FM						0,05		
⁴⁰ K	55	TM	$1,\!9$	0,9	$1,\!9$	1,8	1,5	2,2	J	0,98
		\mathbf{FM}	$0,\!29$	$0,\!13$	$0,\!28$	0,27	1,5	$0,\!29$	J	$0,\!98$
[Vah04b]	g	TM	1,3	0,4		1,2	1,4	1,3		0,90
	8	FM	0,47	0,42		0,35	2,3	0,48		0,90

Tabelle 5.8: Transferfaktoren für $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}$ in Gras.



Abbildung 5.5: 137 Cs-Gehalt in Gras und 137 Cs-Konzentrationsverhältnisse von Gras zu zugehörigen Böden in Abhängigkeit vom 137 Cs-Gehalt in Weideboden.



Abbildung 5.6: ⁴⁰K-Gehalt in Gras und ⁴⁰K-Konzentrationsverhältnisse von Gras zu zugehörigen Böden in Abhängigkeit vom ⁴⁰K-Gehalt in Weideboden.

5.2.4 Wurzelgemüse

Die für die untersuchten Wurzelgemüse ermittelten Transferfaktoren sind in den Tabellen 5.9 und 5.10 zusammengestellt.

Für ¹³⁷Cs zeigt sich für den Datensatz aller Wurzelgemüseproben erneut eine gute Übereinstimmung zu der Angabe aus [BS95] und jener aus [TRS94] für Ton- und Lehmböden. Der für Rote Bete gefundene Wert entspricht in guter Näherung Angaben aus [MP93] und [Han03], die sich allgemein auf Rüben, nicht speziell auf Rote Bete beziehen. Auch für Kartoffeln kann von einer Übereinstimmung zu [BS95] gesprochen werden. Der Wert aus [TRS94] für Ton- und Lehmböden liegt, ebenso wie eine Angabe in [Han03], leicht höher, aber in der hier ermittelten Größenordnung. Der in [Han03] genannte Transferfaktor für Möhren liegt um einen Faktor 3 unter dem Wert dieser Arbeit.

Die Annahme einer Lognormalverteilung für den Transferfaktor für ¹³⁷Cs kann nicht abgelehnt werden, wenn man die spezifische Aktivität des Gemüses auf die Trockenmasse bezieht. Ansonsten ergibt sich eine rechtssteile Verteilung mit $R_{QQ}^2 = 0.87$ (siehe Abb. B.28 auf Seite 196 für den QQ-Plot).

Für ⁴⁰K zeigt sich eine gute Übereinstimmung zu einer Angabe aus [Vah04b] für den nicht-essbaren Anteil von Wurzelgemüsen. Es ist jedoch aufgrund der bereits diskutierten Probenbehandlung an der SUAEU unklar, zu welchem Anteil die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Wurzelgemüseproben auch nicht-essbare Bestandteile enthielten. In Bezug auf die Trockenmasse zeigen die drei untersuchten Wurzelgemüsearten ähnliche ⁴⁰K-Transferfaktoren. Legt man die Frischmasse zugrunde, ergeben sich für Kartoffeln etwas

höhere Werte als für die anderen beiden Materialien. Die Annahme einer Lognormalverteilung für den zusammengefassten Datensatz kann nicht abgelehnt werden, insbesondere nicht, wenn man die Frischmasse als Bezugsmasse verwendet.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{ m QQ}$
Kartoffeln	6	TM	0,025	0,010	0,024	0,024	$1,\!6$	0,026	J	
		\mathbf{FM}	0,006	0,002	$0,\!005$	$0,\!005$	1,6	0,006	J	
[TRS94]-TL	67	TM					EW	0,07 (V	/B: 0,0	$07\!-\!0,7)$
[TRS94]-S	79	TM					EW	0,17 (V	/B: 0,0	17-1,7)
[TRS94]-T	3	TM					EW	0,27 (V	/B: 0,0	27 – 2, 7)
[Han 03]		FM						0,010		
[BS95]		FM						0,007		
[MP93]		FM						0,01		
Möhren	4	TM	$0,\!05$	0,02	0,04	0,04	$1,\!5$	$0,\!05$	J	
		$_{\rm FM}$	0,006	0,002	$0,\!005$	$0,\!005$	1,5	0,006	J	
[Han 03]		FM						0,002		
Rote Bete	5	TM	0,06	0,03	0,06	$0,\!05$	1,7	0,06	J	
		\mathbf{FM}	0,006	0,003	0,006	0,006	1,7	0,007	J	
Rüben [MP93]		FM						0,005		
Rüben [Han03]		FM						0,004		
Alle	15	TM	0,04	0,02	0,03	0,03	2,0	0,04	J	0,96
		$_{\rm FM}$	0,006	0,003	0,006	$0,\!005$	$1,\!9$	0,006	Ν	$0,\!87$
[TRS94]-TL	18	TM					EW	0,04 (V	/B: 0,0	04–0,4)
[TRS94]-S	17	TM					EW	0,011 (VB: 0,	0011 - 0, 11)
[BS95]		FM						0,005		
[MP93]		FM						0,01		

Tabelle 5.9: Transferfaktoren für $^{137}\mathrm{Cs}$ in Wurzelgemüse.

5 Transfer von Cäsium-137 und Kalium-40

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Kartoffeln	6	TM	3,2	0,9	3,1	3,1	$1,\!3$	3,2	J	
		$_{\rm FM}$	0,71	$0,\!19$	$0,\!68$	$0,\!69$	$1,\!3$	0,72	J	
Möhren	4	TM	3,1	$1,\!0$	3,3	3,0	1,5	3,2	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!37$	$0,\!12$	$0,\!38$	$0,\!35$	1,5	$0,\!38$	J	
Rote Bete	5	TM	3,8	$1,\!0$	$_{3,9}$	3,7	$1,\!3$	$_{3,8}$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!42$	$0,\!11$	$0,\!44$	$0,\!41$	$1,\!3$	$0,\!42$	J	
Alle	15	TM	3,4	0,9	3,3	3,2	$1,\!3$	3,4	J	0,94
		$_{\rm FM}$	$0,\!52$	$0,\!21$	$0,\!49$	$0,\!48$	1,5	$0,\!53$	J	$0,\!98$
[Vah04b]:										
essbar	8	FM	0,38	0,31		0,29	2,2	0,39		
nicht-essbar	6	FM	0,58	0,48		0,45	2,1	0,59		

Tabelle 5.10: Transferfaktoren für 40 K in Wurzelgemüse.

5.2.5 Blattgemüse

Auch beim Blattgemüse zeigt sich für ¹³⁷Cs (Tabelle 5.11) eine gute Übereinstimmung zu [TRS94], legt man Ton- und Lehmböden zugrunde. Speziell für Kohl konnte [TH02] eine als geometrischer Mittelwert bezeichnete Angabe entnommen werden, die dem hier ermittelten geometrischen Mittelwert entspricht. Der in [Han03] genannte Transferfaktor ist wiederum etwas niedriger als der Wert dieser Arbeit.

Es ist festzustellen, dass die ¹³⁷Cs-Transferfaktoren für die unterschiedlichen Blattgemüsesorten stark variieren (zwischen Kohl und Kopfsalat besteht ein Unterschied von einer Größenordnung), was sich in der hohen geometrischen Standardabweichung für den zusammengefassten Datensatz niederschlägt.

Die Annahme einer Lognormalverteilung ist insbesondere bei Wahl der Frischmasse als Bezugsmasse abzulehnen. Dies verdeutlicht der entsprechende QQ-Plot (Abb. B.29 auf Seite 196), der auf mehrere zugrunde liegende Verteilungen hinweist.

Für 40 K (Tabelle 5.12) liegen die auf die Trockenmasse der Pflanzen bezogenen Transferfaktoren der vier Blattgemüsesorten in derselben Größenordnung, andernfalls weichen die Werte für Sauerampfer nach oben hin ab. Die Annahme einer Lognormalverteilung des zusammengefassten Datensatzes ist insbesondere im erstgenannten Fall nicht abzulehnen.

In [Vah04b] werden sowohl für essbare als auch für nicht-essbare Anteile von Blattgemüse etwas niedrigere 40 K-Transferfaktoren genannt. Ob der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Datensatz für Blattgemüse mit dem aus jener Arbeit in Bezug auf 40 K vergleichbar ist, musste jedoch aufgrund der unterschiedlichen enthaltenen Blattgemüsesorten bereits in Abschnitt 4.1.2 in Frage gestellt werden.

Material	N	Bezug	$\mathbf{A}\mathbf{M}$	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Sauerampfer	9	TM	$0,\!17$	0,05	$0,\!17$	0,16	1,4	$0,\!17$	J	0,92
		\mathbf{FM}	0,033	$0,\!011$	0,033	0,031	1,5	$0,\!034$	J	$0,\!86$
Petersilie	1	TM	0,097	0,012						
		\mathbf{FM}	$0,\!0116$	$0,\!0014$						
Kohl	6	TM	$0,\!05$	$0,\!05$	0,03	0,03	$_{3,0}$	0,06		
		\mathbf{FM}	$0,\!005$	$0,\!005$	0,002	0,003	$_{3,0}$	$0,\!006$		
[TH02]		TM				0,026	(VB:	0,0021-0	0,33)	
[Han 03]		FM						0,002		
Kopfsalat	2	TM	0,8	$0,\!4$		0,7	1,7	0,8		
		\mathbf{FM}	$0,\!04$	$0,\!02$		$0,\!04$	$1,\!7$	$0,\!04$		
Alle	18	TM	0,19	0,24	0,13	0,10	3,4	0,22	J	0,94
		\mathbf{FM}	0,023	$0,\!017$	0,022	0,014	3,7	0,032	Ν	$0,\!86$
[MP93]		FM						0,02		
Grüne Gemüs	e:									
[TRS94]-TL	165	TM					EW	: 0,18 (N	VB: 0,0	019-1,7)
[TRS94]-S	90	TM					EW	: 0,46 (N	VB: 0,0	047–4,5)
[TRS94]-T	\mathcal{Z}	TM					EW	: 0,26 (N	VB: 0,0	025-2,7)
[BS95]		FM						0,007		

Tabelle 5.11: Transferfaktoren für $^{137}\mathrm{Cs}$ in Blattgemüse.

Tabelle 5.12: Transferfaktoren für $^{40}\mathrm{K}$ in Blattgemüse.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Sauerampfer	8	TM	$6,\!8$	2,0	6,4	6,6	$1,\!3$	6,9	J	0,95
		\mathbf{FM}	$1,\!31$	$0,\!47$	$1,\!27$	$1,\!24$	1,5	$1,\!34$	J	0,87
Petersilie	1	TM	5,0	$0,\!6$						
		\mathbf{FM}	$0,\!59$	$0,\!07$						
Kohl	6	TM	4,0	0,7	4,0	4,0	1,2	$_{4,0}$		
		\mathbf{FM}	$0,\!39$	$0,\!06$	$0,\!38$	$0,\!38$	1,2	$0,\!39$		
[TH02]		TM				2,7 (1	VB: 1,	2-6,0)		
Kopfsalat	2	TM	6,6	$1,\!1$		6,6	1,2	6,7		
		\mathbf{FM}	$0,\!33$	$0,\!06$		0,33	1,2	$0,\!33$		
Alle	17	TM	5,6	2,0	5,5	5,3	1,4	5,7	J	0,97
		$_{\rm FM}$	$0,\!84$	$0,\!56$	$0,\!59$	$0,\!69$	$1,\!9$	$0,\!85$	J	0,92
[Vah04b]:										
essbar	18	FM	0,25	0,18		0,21	1,8	0,24		
nicht-essbar	8	FM	0,21	0,06		0,20	1,3	0,21		

5.2.6 Sonstige Pflanzen

Den Tabellen 5.13 und 5.14 können die ermittelten Transferfaktoren für die übrigen untersuchten Pflanzen (Erbse, Gurke, Tabak und Tomate) entnommen werden. Leider waren in diesen Fällen in der Literatur nur wenige Angaben zu finden. Lediglich für den Transfer von ¹³⁷Cs in Tomaten konnten zwei Werte zum Vergleich herangezogen werden, wobei sich der in [MP93] genannte Wert auf Fruchtgemüse allgemein bezieht. Der in [TRS94] genannte Erwartungswert liegt etwa um einen Faktor 2 über dem im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Erwartungswert.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW
Erbse	2	TM	0,03	0,02		0,02	2,2	0,03	
		\mathbf{FM}	0,006	$0,\!004$		$0,\!005$	2,2	$0,\!007$	
Gurke	4	TM	$0,\!18$	0,20	0,08	$0,\!12$	2,5	$0,\!18$	J
		\mathbf{FM}	0,006	0,006	0,003	$0,\!004$	2,5	0,006	J
Tabak	5	TM	0,37	0,09	0,37	0,36	$1,\!3$	$0,\!37$	J
		$_{\rm FM}$	0,037	0,009	0,037	0,036	1,3	0,037	J
Tomate	4	TM	0,10	0,03	0,11	0,10	1,5	0,10	J
		$_{\rm FM}$	0,006	0,002	0,006	0,006	1,5	0,006	J
[TRS94]	$\mathcal{2}$	TM						0,22	
Fruchtgemüse [MP93]		FM						0,01	

Tabelle 5.13: Transferfaktoren für $^{137}\mathrm{Cs}$ in sonstige Pflanzen.

Tabelle 5.14: Transferfaktoren für $^{40}\mathrm{K}$ in sonstige Pflanzen.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW
Erbse	2	TM	1,41	0,02		1,41		1,41	
		\mathbf{FM}	$0,\!32$	$0,\!01$		$0,\!32$		$0,\!32$	
Gurke	5	TM	4,5	0,8	4,5	4,4	1,2	4,5	J
		\mathbf{FM}	$0,\!14$	$0,\!02$	$0,\!14$	$0,\!14$	1,2	$0,\!14$	J
Tabak	5	TM	5,3	$1,\!9$	5,0	5,1	1,4	5,4	J
		\mathbf{FM}	$0,\!53$	$0,\!19$	$0,\!50$	$0,\!51$	1,4	$0,\!54$	J
Tomate	5	TM	4,0	$1,\!3$	3,3	3,8	1,3	4,0	J
		\mathbf{FM}	$0,\!23$	$0,\!08$	$0,\!19$	$0,\!22$	1,3	$0,\!23$	J

5.2.7 Beeren

Sowohl für Beeren als auch Pilze stellt sich die Frage des geeigneten Bezugsmaterials bei der Bestimmung von Konzentrationsverhältnissen bzw. Transferfaktoren, da für den Waldbewuchs neben Bodenproben auch organische Auflagen vermessen werden konnten. Um diese Frage zu entscheiden, sind Kenntnisse über den Prozess der Aufnahme von Nährstoffen durch Beeren und Pilze notwendig. Von entscheidender Bedeutung ist insbesondere die Wurzeltiefe bei Beeren bzw. bei Pilzen die Tiefe, bis zu der das Mycel reicht. Diese Tiefen können jedoch je nach Situation sehr unterschiedliche Werte annehmen und sind auch von den einzelnen Beeren- bzw. Pilzarten abhängig. Problematisch ist desweiteren, dass gerade im Wald Radionuklide auch über andere Pfade als Wurzel oder Mycel insbesondere an die Oberfläche von Frucht bzw. Fruchtkörper gelangen können. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Resuspension genannt (siehe Abschnitt 2.4.4).

Aus diesen Gründen werden im Folgenden sowohl für Waldbeeren als auch für Pilze beide Transferfaktoren, d.h. Boden-Frucht(körper) und Organische Auflage-Frucht(körper), angegeben.

Transfer Boden-Beeren

Die Transferfaktoren Boden-Beeren können den Tabellen 5.15 und 5.16 entnommen werden. Erwartungsgemäß zeigen sich im Falle des ¹³⁷Cs die höchsten Werte für Heidel- und Preiselbeeren und wesentlich geringere Transferfaktoren für Him- und Erdbeeren. Auffällig ist bei letztgenannten Früchten zudem der Unterschied zwischen Wald- und Hausbeeren, mit deutlich höheren Transferfaktoren für die Hausbeeren. Selbst wenn zwischen Hausund Waldbeeren keinerlei physiologische Unterschiede vorliegen, läßt sich daraus jedoch nicht zwangsläufig ein mit steigendem ¹³⁷Cs-Gehalt im Boden steigender Transferfaktore für die Aufnahme von ¹³⁷Cs in Hausbeeren vermutlich eine relativ gesehen größere Rolle spielt als für Waldbeeren.

Auffällig ist die vergleichsweise geringe geometrische Standardabweichung bei ausschließlicher Betrachtung von Waldhimbeeren, sowie der hohe Wert für diese Größe für den Datensatz aller Beerenproben, die sich aus den großen Unterschieden zwischen den Beerensorten ergibt. Trotzdem kann im letztgenannten Fall die Annahme einer Lognormalverteilung nicht unmittelbar abgelehnt werden. Der zugehörige QQ-Plot weist trotz des recht hohen R^2_{QQ} -Werts auf eine multimodale Verteilung hin (Abb. B.30 auf Seite 197).

Bei allen im Rahmen dieser Arbeit gefundenen ¹³⁷Cs-Transferfaktoren für den Pfad Boden-Beeren zeigen sich im Vergleich zu den angegebenen Literaturwerten deutliche Abweichungen hin zu höheren Werten. Auch die sich ebenfalls auf Christinowka beziehende Angabe aus [Han03] liegt deutlich unter dem Transferfaktor, der in dieser Arbeit ermittelt wurde. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen aus Abschnitt 4.1.2, in dem deutlich höhere spezifische ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Waldbeeren als in [Bot00] konstatiert wurden.¹

Die Transferfaktoren für ⁴⁰K liegen für alle Beerensorten in derselben Größenordnung, mit einer relativ geringen geometrischen Standardabweichung. In diesem Fall kann die Annahme einer Lognormalverteilung für den Datensatz aller Beerenproben nicht abgelehnt werden, wie auch der QQ-Plot (Abb. B.31 auf Seite 197) verdeutlicht.

¹Die Transferfaktoren aus [Han03] beziehen sich auf Messungen, die im Rahmen von [Bot00] durchgeführt wurden.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimbeeren	8	TM	$0,\!95$	0,39	0,90	$0,\!87$	$1,\!6$	0,96	J	0,96
		\mathbf{FM}	$0,\!15$	0,06	$0,\!14$	$0,\!14$	1,6	$0,\!15$	J	$0,\!96$
Haushimbeeren	1	TM	$0,\!28$	0,03						
		\mathbf{FM}	0,043	0,005						
Heidelbeeren	10	TM	62	58	47	30	5,1	111	J	$0,\!91$
		\mathbf{FM}	9,4	8,8	7,1	4,5	5,1	16,7	J	$0,\!91$
Walderdbeeren	3	TM	$1,\!9$	2,0	$1,\!8$	0,7	10,1	10,4	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!20$	0,21	$0,\!18$	$0,\!08$	10,1	$1,\!09$	J	
Hauserdbeeren	2	TM	$0,\!03$	0,02		$0,\!03$	$1,\!8$	$0,\!04$		
		\mathbf{FM}	0,003	0,002		0,003	1,8	$0,\!004$		
Preiselbeeren	1	TM	$37,\!6$	2,7						
		\mathbf{FM}	5,6	0,4						
Alle	25	TM	27	47	1,5	3,0	$13,\!4$	86	J	0,96
		\mathbf{FM}	4,1	4,1	0,2	0,4	$14,\!5$	$14,\!9$	J	$0,\!95$
[MP93]		FM						0,02		
Waldbeeren [Han03]		TM						2,0		
[Car01]:										
Johannisb., Lehmboo	den	FM						0,002		
Johannisb., Ton/Lei	hm	FM						0,001		
Himbeere, Lehmbode	:n	FM						0,006		
Himbeere, Ton/Lehr	n	FM						0,003		
$Erdbeere, \ Ton/Lehm$	ļ,	FM						0,0006		

Tabelle 5.15: Transferfaktoren für 137 Cs in Beeren (bezogen auf den Boden).

Transfer Organische Auflage-Beeren

Die Tabellen 5.17 und 5.18 zeigen die Transferfaktoren in Bezug auf die organischen Auflagen unter Waldbeeren. Literaturangaben konnten in diesem Fall nicht gefunden werden.

Auffällig ist die sowohl für $^{137}\mathrm{Cs}$ als auch für $^{40}\mathrm{K}$ eher geringe Variabilität dieser Transferfaktoren, die in relativ kleinen geometrischen Standardabweichungen resultiert.

Die Annahme einer Lognormalverteilung kann dabei in allen getesteten Fällen nicht abgelehnt werden.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimbeeren	7	TM	$1,\!97$	$0,\!28$	$1,\!97$	$1,\!95$	$1,\!2$	$1,\!97$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!31$	$0,\!04$	$0,\!31$	$0,\!30$	1,2	$0,\!31$	J	
Haushimbeeren	2	TM	1,2	$0,\!3$		$1,\!1$	1,3	1,2		
		\mathbf{FM}	$0,\!18$	$0,\!04$		$0,\!18$	1,3	$0,\!18$		
Heidelbeeren	11	TM	3,0	1,1	2,8	2,8	1,4	3,0	J	0,97
		\mathbf{FM}	$0,\!45$	$0,\!16$	$0,\!43$	$0,\!42$	1,4	$0,\!45$	J	0,97
Walderdbeeren	3	TM	3,6	1,1	$_{3,8}$	3,5	1,4	3,7	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!38$	$0,\!12$	$0,\!40$	$0,\!37$	1,4	$0,\!39$	J	
Hauserdbeeren	2	TM	4,5	4,1		3,4	$_{3,0}$	6,2		
		\mathbf{FM}	$0,\!47$	$0,\!43$		$0,\!36$	$_{3,0}$	$0,\!66$		
Preiselbeeren	1	TM	$2,\!8$	$_{0,3}$						
		\mathbf{FM}	$0,\!41$	$0,\!04$						
Alle	26	TM	2,7	1,4	2,3	2,5	$1,\!6$	2,7	J	0,97
		\mathbf{FM}	$0,\!38$	$0,\!16$	$0,\!35$	$0,\!35$	1,5	$0,\!38$	J	0,99
[Vah04b]:										
Himbeere	1	FM	0,10	0,01						
Brombeere	1	FM	0,07	0,01						

Tabelle 5.16: Transferfaktoren für $^{40}\mathrm{K}$ in Beeren (bezogen auf den Boden).

Tabelle 5.17: Transferfaktoren für 137 Cs in Beeren (bezogen auf die organische Auflage).

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimbeeren	6	TM	$0,\!19$	$0,\!09$	$0,\!19$	$0,\!17$	1,7	$0,\!20$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!03$	$0,\!02$	$0,\!03$	$0,\!03$	1,7	$0,\!03$	J	
Heidelbeeren	10	TM	$0,\!84$	$0,\!45$	$0,\!88$	0,71	$1,\!9$	$0,\!88$	J	$0,\!93$
		\mathbf{FM}	$0,\!13$	$0,\!07$	$0,\!13$	$0,\!11$	$1,\!9$	$0,\!13$	J	0,95
Walderdbeeren	3	TM	$0,\!38$	$0,\!19$	$0,\!47$	$0,\!34$	$1,\!9$	$0,\!41$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!04$	$0,\!02$	$0,\!05$	$0,\!04$	$1,\!9$	$0,\!04$	J	
Alle	19	TM	$0,\!56$	$0,\!45$	0,46	0,40	2,4	$0,\!59$	J	0,98
		\mathbf{FM}	$0,\!08$	$0,\!07$	$0,\!05$	$0,\!06$	2,4	$0,\!09$	J	0,97

Tabelle 5.18: Transferfaktoren für 40 K in Beeren (bezogen auf die organische Auflage).

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Waldhimbeeren	5	TM	1,7	0,4	$1,\!6$	1,60	$1,\!3$	1,7	J	
		FM	$0,\!26$	$0,\!07$	$0,\!26$	$0,\!25$	1,3	$0,\!26$	J	
Heidelbeeren	8	TM	2,2	$1,\!0$	2,1	2,0	$1,\!6$	2,2	J	$0,\!96$
		FM	$0,\!33$	$0,\!15$	$0,\!31$	$0,\!30$	$1,\!6$	$0,\!33$	J	0,97
Walderdbeeren	3	TM	2,2	0,7	2,2	2,1	1,4	2,2	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!23$	$0,\!08$	$0,\!23$	$0,\!22$	1,4	$0,\!24$	J	
Alle	16	TM	2,0	0,8	1,8	$1,\!9$	1,5	2,0	J	0,99
		\mathbf{FM}	$0,\!29$	$0,\!12$	$0,\!26$	$0,\!27$	1,5	$0,\!29$	J	0,97

5.2.8 Pilze

Transfer Boden-Pilze

Den Tabellen 5.19 und 5.20 können die Transferfaktoren für den Pfad Boden-Fruchtkörper entnommen werden. Die Transferfaktoren nehmen für die verschiedenen Pilzarten sehr unterschiedliche Werte an, wobei die stark kontaminierten Butterpilze und Birkenpilze (siehe Abschnitt 4.1.2) besonders hervorgehoben werden können. Die hier erhaltenen Werte sind deutlich höher als die in [Hei92] für Stein- und Butterpilze angegebenen. Die Angabe aus [Han03] für Steinpilze liegt jedoch um etwa einen Faktor 2 über dem Wert dieser Arbeit.

Die geometrischen Standardabweichungen sind im Falle des ¹³⁷Cs insbesondere im Vergleich zu den für die ¹³⁷Cs-Gehalte in Pilzen getätigten Beobachtungen relativ gering. Auffällig ist der sehr niedrige R^2_{QQ} -Wert von 0,83 für den Test auf eine Lognormalverteilung des ¹³⁷Cs-Transferfaktors für Butterpilze. Der QQ-Plot (Abb. B.32 auf Seite 197) deutet dabei auf einen Ausreisser hin. In der Tat ist das Konzentrationsverhältnis für Probe Nr. 692 sehr viel höher als für die restlichen Butterpilzproben (siehe Tabelle B.15), was durch einen relativ geringen ¹³⁷Cs-Gehalt in der zugehörigen Bodenprobe bedingt ist.

Für den gesamten Datensatz der $^{137}\mathrm{Cs}\text{-}\mathrm{Transferfaktoren}$ kann die Annahme einer Lognormalverteilung abgelehnt werden.

Auch die ⁴⁰K-Transferfaktoren liegen über den Literaturangaben aus [Hei92] und [Vah04b], wenngleich die Diskrepanz kleiner ist als für ¹³⁷Cs. Insgesamt bewegt sich der Transferfaktor für ⁴⁰K für alle Pilzarten in vergleichbaren Größenordnungen. Für den Gesamtdatensatz kann die Annahme einer Lognormalverteilung nicht abgelehnt werden.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinpilze	7	TM	$12,\!2$	5,6	$10,\!6$	$11,\!2$	1,5	$12,\!3$	J	
		$\mathbf{F}\mathbf{M}$	$1,\!4$	$0,\!6$	1,2	$1,\!3$	1,5	$1,\!4$	J	
[Hei 92]		FM						0,07		
[Han 03]		TM						22		
Pfifferlinge	7	TM	$_{9,4}$	4,8	8,8	8,3	1,7	9,7	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!80$	$0,\!41$	0,75	0,71	1,7	$0,\!83$	J	
Butterpilze	8	TM	203	216	133	152	2,0	196	J	0,83
		\mathbf{FM}	18	19	12	14	2,0	17	J	0,83
[Hei 92]		FM						1,87		
Birkenpilze	3	TM	80	105	26	41	4,1	112	J	
		\mathbf{FM}	6,2	8,1	2,0	3,2	4,1	8,6	J	
Rotkappe	3	TM	12,7	7,3	11,1	$11,\!3$	1,8	$13,\!5$	J	
		\mathbf{FM}	$1,\!0$	$0,\!6$	0,9	$0,\!9$	1,8	$1,\!0$	J	
Alle	28	TM	73	142	15	25	4,1	67	Ν	0,90
		\mathbf{FM}	6,5	$12,\!6$	$1,\!4$	2,3	4,0	5,9	Ν	0,91

Tabelle 5.19: Transferfaktoren für ¹³⁷Cs in Pilze (bezogen auf den Boden).

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinpilze	8	TM	7,7	$_{3,0}$	7,2	7,2	1,5	7,8	J	0,96
		\mathbf{FM}	$0,\!88$	$0,\!34$	$0,\!82$	$0,\!83$	1,5	$0,\!89$	J	$0,\!96$
[Hei 92]		FM						0,17		
Pfifferlinge	7	TM	$12,\!5$	4,4	$12,\!2$	$11,\!9$	1,4	$12,\!5$	J	
		\mathbf{FM}	$1,\!06$	$0,\!37$	$1,\!04$	$1,\!01$	1,4	$1,\!06$	J	
Butterpilze	8	TM	7,7	1,7	7,1	7,5	1,2	7,7	J	0,93
		\mathbf{FM}	$0,\!68$	$0,\!15$	$0,\!63$	$0,\!67$	1,2	$0,\!69$	J	$0,\!92$
[Hei 92]		FM						0,2		
Birkenpilze	3	TM	12,7	2,2	$13,\!9$	$12,\!6$	1,2	12,8	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!98$	$0,\!17$	$1,\!07$	$0,\!97$	1,2	$0,\!99$	J	
Rotkappe	3	TM	$11,\!3$	1,5	11,7	11,2	1,2	$11,\!3$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!87$	$0,\!12$	$0,\!90$	$0,\!86$	1,2	$0,\!87$	J	
Alle	29	TM	9,7	3,6	9,6	9,1	1,4	$_{9,8}$	J	0,97
		\mathbf{FM}	$0,\!88$	$0,\!30$	$0,\!84$	$0,\!84$	1,4	$0,\!88$	J	$0,\!97$
[Vah04b]:										
Maronen-Röhrling	1	FM	0,11	0,01						
Violetta Ritterling	1	FM	0,13	0,01						
Schirmling	1	FM	0,05	0,01						

Tabelle 5.20: Transferfaktoren für 40 K in Pilze (bezogen auf den Boden).

Transfer Organische Auflage-Pilze

Betrachtet man die Konzentrationsverhältnisse von Pilzen und zughörigen organischen Auflagen (Tabellen 5.21 und 5.22), so fällt in Bezug auf ¹³⁷Cs insbesondere die extrem hohe geometrische Standardabweichung von 21,4 für die Birkenpilze auf. Zwar bezieht sich dieser Wert lediglich auf drei Proben und ist daher nur sehr wenig aussagekräftig, wirft aber dennoch die Frage nach Unstimmigkeiten auf. So kann beispielsweise in diesem Fall bezweifelt werden, ob die Zuordnung der Proben organischer Auflagen zu den einzelnen Pilzproben korrekt ist. Eine Klärung dieses Problems ist an dieser Stelle jedoch nicht möglich. Wie später noch zu diskutieren sein wird (siehe Abschnitt 6.3.3), verursacht diese hohe geometrische Standardabweichung, in Verbindung mit dem ebenfalls recht hohen Wert von 9,1 für Steinpilze, Probleme bei dem Versuch, die Ingestionsdosis für ¹³⁷Cs mit Hilfe der Transferfaktoren anhand der spezifischen Aktivitäten in Böden und organischen Auflagen zu modellieren.

Trotz dieser großen Schwankungen kann die Annahme einer Lognormalverteilung für den Gesamtdatensatz nicht ohne weiteres abgelehnt werden, obschon der QQ-Plot (Abb. B.33 auf Seite 197) Hinweise auf eine multimodale Verteilung liefert.

Für 40 K weichen die Transferfaktoren für die Pilzarten nur um einen Faktor von bis zu ca. 2 voneinander ab, wobei Butterpilze den geringsten 40 K-Transfer zeigen. Die Annahme einer Lognormalverteilung für den Gesamtdatensatz kann in diesem Fall nicht abgelehnt werden.

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	\mathbf{EW}	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinpilze	8	TM	15	36	$0,\!9$	1,2	9,1	$13,\!8$	J	0,82
		\mathbf{FM}	1,7	4,1	0,1	0,1	9,1	$1,\!6$	J	$0,\!82$
Pfifferlinge	8	TM	1,7	$1,\!4$	$1,\!4$	1,3	2,2	$1,\!8$	J	$0,\!98$
		\mathbf{FM}	$0,\!14$	$0,\!12$	$0,\!12$	$0,\!11$	2,2	$0,\!15$	J	$0,\!98$
Butterpilze	8	TM	36	22	32	31	1,9	38	J	$0,\!90$
		\mathbf{FM}	3,2	$1,\!9$	2,8	2,8	$1,\!9$	3,4	J	$0,\!90$
Birkenpilze	3	TM	137	223	16	18	$21,\!4$	1909	J	
		\mathbf{FM}	$10,\!6$	$17,\!2$	1,2	$1,\!4$	$21,\!4$	147	J	
Rotkappe	3	TM	3,6	2,1	$2,\!9$	3,3	1,7	3,8	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!28$	$0,\!16$	$0,\!23$	$0,\!25$	1,7	$0,\!3$	J	
Alle	30	TM	28	73	2,4	4,3	7,4	32,1	J	0,96
		\mathbf{FM}	2,4	5,8	0,2	0,4	7,1	2,7	J	$0,\!96$

Tabelle 5.21: Transferfaktoren für 137 Cs in Pilze (bezogen auf die organische Auflage).

Tabelle 5.22: Transferfaktoren für 40 K in Pilze (bezogen auf die organische Auflage).

Material	N	Bezug	AM	AS	ME	GM	GS	EW	SW	$R^2_{\rm QQ}$
Steinpilze	4	TM	$13,\!6$	4,4	$12,\!4$	13,1	1,4	13,7	J	
		\mathbf{FM}	$1,\!55$	$0,\!50$	$1,\!42$	$1,\!50$	1,4	$1,\!57$	J	
Pfifferlinge	5	TM	$19,\!8$	5,2	19,7	$19,\!3$	1,3	$20,\!0$	J	
		\mathbf{FM}	$1,\!69$	$0,\!44$	$1,\!67$	$1,\!64$	1,3	1,70	J	
Butterpilze	8	TM	8,8	2,2	8,8	8,5	1,3	8,9	J	$0,\!86$
		\mathbf{FM}	$0,\!78$	$0,\!19$	$0,\!79$	0,76	1,3	$0,\!79$	J	$0,\!86$
Birkenpilze	3	TM	$17,\!3$	$10,\!6$	$13,\!6$	$15,\!3$	1,8	$18,\!3$	J	
		\mathbf{FM}	$1,\!33$	$0,\!82$	$1,\!05$	$1,\!18$	1,8	$1,\!41$	J	
Rotkappe	3	TM	$11,\!9$	2,3	$12,\!4$	$11,\!8$	1,2	$12,\! 0$	J	
		\mathbf{FM}	$0,\!92$	$0,\!18$	$0,\!96$	$0,\!91$	1,2	$0,\!92$	J	
Alle	23	TM	$13,\!6$	6,3	$12,\!4$	12,4	1,5	$13,\!6$	J	$0,\!97$
		\mathbf{FM}	$1,\!20$	$0,\!55$	$1,\!05$	$1,\!09$	1,6	$1,\!21$	J	$0,\!96$

5.3 Zusammenfassung

- Für den Transfer von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K in Milch und Schweinefleisch wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, die die Verteilungen der jeweiligen Aktivitätskonzentrationen in Tierfutter, Milch oder Fleisch berücksichtigen. Die durch die Simulationen erhaltenen Verteilungen konnten am besten mit Lognormalverteilungen gefittet werden. Dabei zeigten sich insbesondere für Kuhmilch sehr gute Übereinstimmungen zu Literaturangaben. Auch für Ziegenmilch und Schweinefleisch konnten die Größenordnungen zitierter Werte reproduziert werden.
- Für alle weiteren Probenmaterialien, für die die Bestimmung von Transferfaktoren möglich war, konnten Konzentrationsverhältnisse anhand zusammengehöriger Probenpaare bestimmt werden. Auch in diesen Fällen konnte für die zusammengefassten Datensätze die Annahme einer Lognormalverteilung oftmals nicht abgelehnt werden. Probleme zeigten sich dabei, wenn die Probenarten (wie z. B. verschiedene Pilzarten) mit stark unterschiedlichen Transferfaktoren zu einem Datensatz zusammengefasst wurden.
- Für ⁴⁰K zeigten sich in der Regel höhere Transferfaktoren als für ¹³⁷Cs. Abweichungen davon konnten nur in Bezug auf stark mit ¹³⁷Cs kontaminierte Nahrungsmittel wie Beeren und Pilze festgestellt werden, für die sich auch die höchsten ¹³⁷Cs-Transferfaktoren ergaben. Die ¹³⁷Cs-Transferfaktoren für den Pfad Boden-Frucht(körper) sind für Heidel- und Preiselbeeren sowie alle Pilzarten etwa gleich groß oder größer als die entsprechenden Transferfaktoren für ⁴⁰K. Selbiges gilt für den Pfad Organische Auflage-Fruchtkörper für alle Pilzarten außer Pfifferlinge.
- Die Ergebnisse für Gras und Getreide weisen auf einen für steigende ⁴⁰K-Aktivitätskonzentrationen im Boden sinkenden Transferfaktor hin, was durch die homöostatische Kontrolle des ⁴⁰K erklärbar ist. Die Aktivitätskonzentration in der Pflanze scheint dabei weitestgehend unabhängig vom Gehalt im Boden zu sein. Die Verwendung von Transferfaktoren für ⁴⁰K ist daher prinzipiell in Frage zu stellen. Für ¹³⁷Cs konnte hingegen für diese Probenmaterialien keine deutliche Abhängigkeit des Transferfaktors von der Aktivitätskonzentration im Boden beobachtet werden, was in [EK02] erwähnten Beobachtungen für Binsen- und Heidegewächse, Blaubeeren (eine Heidelbeerart) und Preiselbeeren entspricht.
- Vergleiche mit Literaturwerten ergaben in vielen Fällen gute Übereinstimmungen. Dies gilt nicht für den Transfer in Pilze.
 Vergleiche mit [TRS94] lieferten in der Regel die beste Übereinstimmung mit den Werten für Ton- und Lehmböden. Dies bestätigt eine Angabe in [Han03], in der podsolische Lehmböden mit verhältnismäßig hohen pH-Werten als typisch für die beprobte Gegend genannt werden.

5 Transfer von Cäsium-137 und Kalium-40

6 Modellierung der internen Strahlenexposition durch Cäsium-137

6.1 Vorbemerkungen

Ergebnisse für die Ingestionsdosis durch ¹³⁷Cs, die sich auf den Zeitraum Juli 1998 bis Juli 1999 beziehen, können [Bot00] entnommen werden. Dabei wurden neben einer auf Untersuchungen zu Verzehrsgewohnheiten der Einwohner Christinowkas gestützten Modellierung, bei der mit Punktschätzern gearbeitet wurde, auch Messungen des ¹³⁷Cs-Ganzkörpergehaltes an 18 Personen vorgenommen.

Im erstgenannten Fall kann die Effektive Ingestionsdosis pro Jahr, H_{ing} , die sich stets auf eine bestimmte Altersgruppe g bezieht, d. h. $H_{ing} = H_{ing}(g)$, über

$$H_{\text{ing}}(g) = h(g) \sum_{n} V_n(g) \cdot \mathcal{A}_n \tag{6.1}$$

berechnet werden. Dabei ist h(g) die altersabhängige Effektive Folgedosis pro Inkorporation bei Ingestion eines bestimmten Radionuklids für Einzelpersonen der Bevölkerung. Dieser Wert ist für sechs Altersgruppen in [Eur96] tabelliert. Die Werte für ¹³⁷Cs wurden im Rahmen dieser Arbeit als Punktschätzer verwendet (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Ingestionsdosiskoeffizienten h(g) für ¹³⁷Cs in 10⁻⁸ Sv Bq⁻¹ [Eur96].

Der Index n in (6.1) kennzeichnet die einzelnen Bestandteile eines möglichst repräsentativen Nahrungsmittelkorbs der untersuchten Bevölkerungsgruppe. $V_n(g)$ steht damit für die jährlichen Verzehrsmengen der Nahrungskomponenten für die jeweilige Altersgruppe. \mathcal{A}_n ist die spezifische ¹³⁷Cs-Aktivität in den betrachteten Nahrungsmitteln.

Eine Dosismodellierung gemäß (6.1) kann jedoch zu einer Überschätzung der Ingestionsdosis führen, da die Konzentration von Radionukliden in Lebensmitteln durch die Zubereitung, d. h. Prozesse wie z. B. Trocknen, Kochen, Braten oder auch die Entfernung nichtessbarer Teile, verringert werden kann und sich die Messwerte der spezifischen Aktivität in Lebensmitteln in der Regel auf den Rohzustand beziehen. Für eine konservative Dosisabschätzung mag dies unter Umständen ein geringes Problem darstellen, anders verhält es sich jedoch, falls angestrebt wird, eine möglichst realistische Modellierung vorzunehmen. Retentionsfaktoren r_n für Cäsium und verschiedene Zubereitungsarten unterschiedlicher Lebensmittel können [TRS94] entnommen werden und wurden im Rahmen dieser Arbeit verwendet (siehe Abschnitt 6.2.2). r_n ist dabei definiert als die Gesamtmenge des Radionuklids im zubereiteten Lebensmittel n, dividiert durch die Gesamtmenge des Radionuklids im rohen Lebensmittel n. Für die Effektive Ingestionsdosis kann dann

$$H_{\rm ing}(g) = h(g) \sum_{n} V_n(g) \cdot r_n \mathcal{A}_n \tag{6.2}$$

angesetzt werden.

Die Ansätze (6.1) bzw. (6.2) lassen sich desweiteren dahingehend variieren, als dass nicht die spezifische Aktivität des Nahrungsmittels verwendet wird, sondern mit \mathcal{A}_{k_n} die eines "Ausgangskompartiments" aus der mit Hilfe eines Transferfaktors \mathcal{T}_n die spezifische Aktivität für das Nahrungsmittel errechnet werden kann:

$$\mathcal{A}_{k_n} \mathcal{T}_n = \mathcal{A}_n \quad \Longrightarrow \quad H_{\text{ing}}(g) = h(g) \sum_n V_n(g) \cdot r_n \mathcal{A}_{k_n} \mathcal{T}_n.$$
(6.3)

Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn z. B. nur Messwerte zur Aktivitätskonzentration im Boden vorliegen, nicht aber für den Bewuchs. Mit Hilfe von (6.3) kann in dem Fall dennoch eine Dosismodellierung vorgenommen werden. Ist eine "direkte" Modellierung gemäß (6.1) bzw. (6.2) möglich, so kann (6.3) zur Prüfung der Konsistenz der Ergebnisse für spezifische Aktivität und Transferfaktor dienen (siehe Abschnitt 6.3.3).

Bei der eingangs erwähnten, in [Bot00] beschriebenen Dosismodellierung fanden weder Retentionsfaktoren der Lebensmittelzubereitung noch Transferfaktoren Verwendung. Tabelle 6.2 zeigt diese Ergebnisse aus jener Arbeit. Dabei wurde die Ingestion als alleinig relevant für die interne Exposition angesehen. Die Altersgruppen wurden in Erwachsene und Kinder unterschieden. Zwei Männern aus der Gruppe der 18 Personen, die sich für Ganzkörpermessungen zur Verfügung gestellt hatten, waren insofern "extreme" Verhaltensweisen zuzuschreiben, als dass sie einen vergleichsweise hohen Pilzkonsum zeigten und viel Zeit in den Wäldern verbrachten. Mit der Bezeichnung "typisch" sind alle übrigen Personen gemeint, d. h. solche ohne "extreme" Verhaltensweisen. Eine Frau und ein Mann aus der Gruppe der "typischen" Personen ernährten sich auf eine besonders "vorsichtige" Art und Weise, da sie auf jeglichen Pilzkonsum verzichteten.

In diesem Kapitel sollen nun zum Vergleich folgende Modellierungen mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden:

- 1. "Direkte" Modellierung mit spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln aus dieser Arbeit (Abschnitt 6.3.1).
- "Direkte" Modellierung mit im Rahmen von [Bot00] ermittelten spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln (Abschnitt 6.3.2).
- 3. Modellierung mit Transferfaktoren und spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Böden und organischen Auflagen aus dieser Arbeit (Abschnitt 6.3.3).

				Interne Exposition
Methode	Altersgruppe	Verhalten	Geschlecht	$[mSv a^{-1}]$
Ganzkörpermessungen	Erwachsene	Jedes	Beide	$0,\!45\cdot 3,\!8^{\pm 1}$
		Typisch	Beide	$0,30 \cdot 2,1^{\pm 1}$
			Männer	$0,\!45\cdot 1,\!4^{\pm 1}$
			Frauen	$0,\!25\cdot 1,\!4^{\pm 1}$
		Extrem	Männer	$3,0 \ / \ 17,3$
		Vorsichtig	Frau / Mann	$0,\!16 \not 0,\!28$
	Kinder	Normal	Beide	$0,\!20\cdot1,\!3^{\pm1}$
Modellierung mit	Erwachsene	Typisch	Beide	$0,\!39\cdot1,\!5^{\pm1}$
Verzehrsgewohnheiten		Vorsichtig	Beide	$0,21 \cdot 1,5^{\pm 1}$

Tabelle 6.2: Interne Exposition durch $^{137}\mathrm{Cs}$ für Bewohner Christinowkas im Zeitraum 1998/99 [Bot00].

Im folgenden sollen jedoch zunächst die für die Simulationen als Eingabeparameter notwendigen Verzehrsgewohnheiten und Retentionsfaktoren der Lebensmittelzubereitung diskutiert und aufgelistet werden.

6.2 Parameter der Modellierung

6.2.1 Verzehrsgewohnheiten

Im Rahmen von [Bot00] wurden zwei Erhebungen zur Ermittlung von Verzehrsgewohnheiten der Bewohner der Zone II bzw. Christinowkas durchgeführt. Einerseits fanden in drei Dörfern der Zone II detaillierte Umfragen zu den Verzehrsgewohnheiten statt ("Erhebung 1"), andererseits wurden die Verzehrsmengen an Pilzen, Waldbeeren und Milch für 13 Bewohner Christinowkas, davon neun Erwachsene und vier Kinder, von Juli 1998 bis Juli 1999 überwacht ("Erhebung 2"). Tabelle 6.3 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse, die sich auf Erwachsene beziehen, wobei anzumerken ist, dass für die Berechnung des Verzehrs an Beeren und Pilzen von Erwachsenen aus "Erhebung 2" in [Bot00] angenommen wurde, dass Kinder pro Jahr 50 % der Mengen an Waldbeeren und Pilzen verzehren, die für Erwachsene anzusetzen sind. Für den Milchkonsum von Kindern wird in [Bot00] im Zusammenhang mit "Erhebung 2" ein Wert von 0.4 kg a^{-1} genannt, d. h. 80 % des Verzehrs Erwachsener. Es fällt auf, dass in der zweiten Erhebung, deren Werte für die in Abschnitt 6.1 erwähnte Modellierung der Ingestion verwendet wurden, wesentlich geringere Verzehrsmengen ermittelt wurden als in der ersten. Um eine fundierte Entscheidung über die als Eingabeparameter zu verwendenden Verzehrsgewohnheiten zu treffen, sind aufgrund dieser Diskrepanz weitere Literaturangaben heranzuziehen.

Eine gute Vergleichsmöglichkeit stellen die Angaben aus [Tra04] dar. In jener Arbeit wurden die Verzehrsgewohnheiten erwachsener Bewohner des Dorfes Kozhany in der Nähe der russischen Stadt Bryansk ermittelt. Bei der Region um Bryansk handelt es sich um die am

		Verzehrsmenge [kg a ⁻¹]		
Lebensmittel	Massenbezug	Erhebung 1	Erhebung 2	
Milch	FM	365	183	
Brot	FM	146		
Kartoffeln	FM	183		
Rüben	FM	18,3		
Kohl	FM	18,3		
Gartenfrüchte	FM	146		
Fleisch	FM	73		
Fisch	FM	18,3		
Eier	FM	5,1		
Waldbeeren	TM	4,0	0,440	
Pilze	TM	3,7	0,325	

Tabelle 6.3: Verzehrsgewohnheiten für erwachsene Bewohner der Zone II [Bot00].

stärksten vom Tschernobyl-Unglück betroffene Region in Russland. Kozhany liegt in einer ländlichen Gegend, deren Bevölkerung sich zumindest teilweise von landwirtschaftlichen Produkten, Fischen und Tieren aus der unmittelbaren Umgebung ernährt. Damit sollten die Verzehrsgewohnheiten für diesen Ort zumindest bis zu einem gewissen Grad mit denen von Christinowka vergleichbar sein.

Im Rahmen der Erhebung für Kozhany wurden im Juli bzw. Oktober 1996 113 bzw. 103 zufällig ausgewählte Personen des damals 580 Einwohner zählenden Dorfes befragt. Dabei wurde nach Männern und Frauen unterschieden. Neben den Mittelwerten wird auch die Standardabweichung genannt. Tabelle 6.4 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse.

		Verzehrsmenge [kg a		
Lebensmittel	Massenbezug	Männer	Frauen	
Milch/-produkte	FM	186 ± 33	168 ± 26	
${ m Fleisch/-produkte}$	FM	62 ± 4	58 ± 4	
Brot/Bäckereiprodukte	FM	139 ± 11	113 ± 8	
Kartoffeln	FM	259 ± 11	226 ± 11	
Gemüse/Wurzelgemüse	FM	95 ± 4	84 ± 4	
Obst	FM	58 ± 8	47 ± 4	
Eier	FM	20 ± 3	11 ± 2	
Pilze	FM	$4{,}4\pm1{,}5$	$1,5\pm0,\!4$	
Beeren	FM	$1{,}1\pm0{,}4$	$1,\!8\pm0,\!4$	
Fisch	FM	18 ± 4	11 ± 4	

Tabelle 6.4: Verzehrsgewohnheiten im Jahr 1996 für erwachsene Einwohner von Kozhany, Russland [Tra04]. Zu beachten ist, dass sich die Angaben für Pilze und Beeren aus [Tra04] im Gegensatz zu jenen aus [Bot00] auf die Frischmasse beziehen. Mit den Mittelwerten aller Beeren- bzw. Pilzsorten aus [Mes00] für die Umrechnung zwischen Trocken- und Frischmasse,

$$\begin{array}{rcl} (\mathrm{TM/FM})_{\mathrm{Beeren}} &=& 0.148\\ (\mathrm{TM/FM})_{\mathrm{Pilze}} &=& 0.091, \end{array}$$

ergeben sich die Werte der Tabelle 6.5.

Tabelle 6.5: U	Jmgerechnete	Verzehrsgewohnheiten	gemäß	Tra04	
----------------	--------------	----------------------	-------	-------	--

		Verzehrsmenge [kg a ⁻¹]			
Lebensmittel	Massenbezug	Männer	Frauen		
Pilze	ТМ	0,40	0,13		
Beeren	TM	$0,\!16$	$0,\!27$		

Angaben zu Verzehrsgewohnheiten in Zentral- und Osteuropa können [Iye04] entnommen werden (siehe Tabelle 6.6).

Lebensmittel	Massenbezug	Verzehrsmenge [kg a^{-1}]
Milch	FM	105
Käse	FM	$7,\!7$
Fleischprodukte	FM	51
Fisch/Meeresfrüchte	FM	8,0
Eier	FM	$7,\!7$
Fette	FM	23
Zucker	FM	21
Kartoffeln	FM	72
Andere Gemüse	FM	66
Obst	FM	42
Getreide	FM	126

Tabelle 6.6: Verzehrsgewohnheiten für die zentral- und osteuropäische Bevölkerung [Iye04].

Nicht für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit können die Lebensmittel Obst bzw. Gartenfrüchte, Eier, Fette und Zucker berücksichtigt werden, da keine solchen Proben vorlagen. Auch der Verzehr von Trinkwasser kann aufgrund fehlender Wasserproben nicht in die Modellierung einfließen. In [Han03] wird die Strahlenexposition durch Trinkwasser aus örtlichen Brunnen allerdings als unbedeutsam beurteilt.

Für die Simulationen wurden die folgenden Lebensmittel verwendet:

• Milch

6 Modellierung der internen Strahlenexposition durch Cäsium-137

- Pilze
- Beeren
- Fleisch
- Fisch
- Kartoffeln
- Wurzelgemüse (Der Begriff "Rüben" aus [Bot00] wird dabei als Überbegriff für Wurzelgemüse aufgefasst.)
- Blattgemüse (Auch der Begriff "Kohl" aus [Bot00] wird als Bezeichnung für Blattgemüse allgemein angesehen.)
- Getreide (Da unklar ist, wie "Getreide" und "Brot" in diesem Zusammenhang unterschieden werden können, werden diese beiden Materialien miteinander identifiziert.)
- Gurken
- Tomaten
- Erbsen

Für Milch, Pilze und Beeren zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Werte der zweiten Erhebung in [Bot00] mit den in [Tra04] genannten Verzehrsgewohnheiten (nach Umrechnung des Massenbezugs).

Für Fleisch, Fisch und Getreide kann von einer guten Übereinstimmung der Werte aus der ersten Erhebung aus [Bot00] mit [Tra04] gesprochen werden. Für Fleisch und Getreide ist desweiteren eine Übereinstimmung mit [Ive04] festzustellen.

Die in [Bot00] und [Tra04] genannten Verzehrsmengen von Kartoffeln sind wesentlich höher als die Angaben in [Iye04] und weichen auch deutlich von Angaben für Deutschland ab, die [MP93] und [Str01] entnommen werden können.¹ Diese Abweichung ist jedoch vermutlich dadurch erklärbar, dass die Lebensverhältnisse der ländlichen Bevölkerung Russlands und der Ukraine deutlich von den in Industrienationen üblichen abweichen. Dem Verzehr von Kartoffeln kommt dort sicher ein noch weitaus größerer Stellenwert zu als mittlerweile in Deutschland.

Für Wurzel- und Blattgemüse finden sich in Bezug auf die Werte aus [Bot00] nur teilweise Entsprechungen in der Literatur.² Trotz dieser Unklarheiten wurden die für die Simulationen verwendeten Verzehrsmengen von Fleisch, Fisch, Getreide, Kartoffeln, Wurzelgemüse und Blattgemüse letztlich den Angaben zu der ersten Erhebung aus [Bot00] entnommen. Für Milch, Pilze und Beeren wurde die zweite Erhebung zugrunde gelegt. Gurken, Tomaten und Erbsen wurden berücksichtigt, indem als Gesamtverzehr der Wert von 40 kg a^{-1} für "Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte" aus [Str01] angenommen wurde. Damit entfallen $13,3 \text{ kg a}^{-1}$ auf jede dieser Gemüsesorten.

Eine Unterscheidung der beiden Geschlechter wurde nicht vorgenommen. Vermutlich beschreiben die Annahmen die Verzehrsgewohnheiten der Männer auf eine realistischere Art

 $^{^{1}58 \, \}mathrm{kg} \, \mathrm{a}^{-1}$ für Erwachsene gemäß [MP93], $55 \, \mathrm{kg} \, \mathrm{a}^{-1}$ inkl. Wurzelgemüse gemäß [Str01]. $^{2}12 \, \mathrm{kg} \, \mathrm{a}^{-1}$ für Wurzelgemüse in [MP93] bzw. $13 \, \mathrm{kg} \, \mathrm{a}^{-1}$ für Blattgemüse in [Str01]

und Weise als die der Frauen. Tabelle 6.4 deutet darauf hin, dass einige der Annahmen für Frauen leicht konservativ sind.

Für eine Unterscheidung der in Tabelle 6.1 aufgeführten Altersgruppen wurden aus den Angaben in [Str01] die Verhältnisse der Verzehrsmengen von Kindern oder Jugendlichen zur Verzehrsmenge Erwachsener für die unterschiedlichen Lebensmittel errechnet (Tabelle 6.7). Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei diesen Annahmen bestenfalls um eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Verhältnisse handeln kann. Dabei wurden die Verhältnisse für "Obst" bzw. "Gemüse/-produkte" für Beeren bzw. Pilze eingesetzt.

	Verzehr relativ zu Erwachsenen							
Lebensmittel	$\leq 1 \mathrm{a}$	1-2a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$1217\mathrm{a}$	$> 17\mathrm{a}$		
Milch	0,35	1,23	1,23	1,31	1,31	1,00		
Fisch	0,07	$0,\!40$	$0,\!40$	$0,\!60$	$0,\!67$	$1,\!00$		
Fleisch	0,06	$0,\!14$	$0,\!56$	0,72	$0,\!89$	$1,\!00$		
Getreide	0,11	$0,\!27$	0,73	$0,\!86$	$1,\!00$	$1,\!00$		
Obst	0,71	$1,\!29$	$1,\!86$	$1,\!86$	1,71	$1,\!00$		
Kartoffeln/Wurzelgemüse	0,55	0,73	$0,\!82$	$1,\!00$	$1,\!00$	$1,\!00$		
Blattgemüse	0,23	$0,\!46$	$0,\!54$	$0,\!69$	$0,\!85$	$1,\!00$		
Gemüse/-produkte	0,13	$0,\!43$	0,75	$0,\!88$	$0,\!88$	1,00		

Tabelle 6.7: Verzehrsmengen relativ zu Erwachsenen [Str01].

Wie in Abschnitt 4.1.2 dargelegt wurde, können die unterschiedlichen Beeren- und Pilzsorten nicht zu einem Datensatz zusammengefasst werden. Das bedeutet, dass auch beim Verzehr nach den verschiedenen Sorten unterschieden werden muss. Die einzigen vorhandenen Angaben zu der Häufigkeit, nach der bestimmte Pilze oder Beeren verzehrt werden, entstammen [Rom04a]. Demnach werden Heidelbeeren "häufig" verzehrt, die übrigen Waldbeeren "selten" sowie Haushimbeeren und -erdbeeren "sehr selten". Für Pilze ist bekannt, dass Steinpilze etwa während 5–6 Monaten im Jahr verzehrt werden, Butterpilze während 3–4 Monaten und Pfifferlinge während etwa zwei Monaten. Birkenpilze und Rotkappen werden "selten" verzehrt. Anhand dieser leider sehr vagen Angaben wurden die Verzehrsanteile der einzelnen Sorten abgeschätzt (Tabelle 6.8).

Beeren	Anteil [%]	Pilze	Anteil [%]
Heidelbeeren	72,5	Steinpilze	48,0
Walderdbeeren	7,5	Butterpilze	30,0
Waldhimbeeren	7,5	Pfifferlinge	17,0
Preiselbeeren	7,5	Birkenpilze	2,5
Hauserdbeeren	2,5	Rotkappe	2,5
Haushimbeeren	2,5		
Summe:	100,0	Summe:	100,0

Tabelle 6.8: Anteile von Beeren- und Pilzsorten zum jeweiligen Gesamtverzehr.

Auch für Milch, Wurzelgemüse, Blattgemüse und Getreide fand aufgrund der Unterschiede zwischen den ¹³⁷Cs-Gehalten einzelner Probensorten eine Differenzierung statt. Mangels genauerer Informationen musste der Gesamtverzehr an Wurzelgemüse (Rote Bete, Möhren) bzw. Getreide (Hafer, Mais, Roggen, Weizen) zu jeweils gleichen Anteilen auf die einzelnen Sorten aufgeteilt werden. Bei der Milch wurde ein Anteil von 95 % für Kuhmilch und 5 % für Ziegenmilch angenommen, bei Blattgemüse ein im Vergleich zum Kopfsalat höherer Kohlkonsum (75 % Kohl, 25 % Kopfsalat). Mit der Kategorie "Fleisch" wurde das Muskelfleisch von Hausschweinen identifiziert. Unberücksichtigt bleibt dabei der Verzehr von Organen und Wild, wobei anzumerken ist, dass die Jagd in der untersuchten Gegend offiziell verboten ist. Eine Unterscheidung der untersuchten Fischsorten erfolgte nicht. Tabelle 6.9 zeigt die für die Monte-Carlo-Simulationen als Eingabeparameter verwendeten Verzehrsmengen, die als Punktschätzer betrachtet werden, da keinerlei Informationen zu möglichen Verteilungen vorliegen.

		Ver	zehrsmen	ige der A	Altersgru	ppen [kg a	, 1
Lebensmittel	Unterkategorie	$\leq 1 \mathrm{a}$	1-2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$12 - 17 \mathrm{a}$	$> 17\mathrm{a}$
Milch	Kuhmilch	60	213	213	227	227	173
	Ziegenmilch	3,2	11,2	11,2	$11,\!9$	$11,\!9$	9,1
Pilze	Steinpilze	0,02	0,07	0,12	0,14	0,14	0,16
	Butterpilze	0,01	0,04	0,07	$0,\!09$	$0,\!09$	$0,\!10$
	Pfifferlinge	0,01	0,02	$0,\!04$	$0,\!05$	$0,\!05$	$0,\!06$
	Birkenpilze	< 0,01	$< 0,\!01$	0,01	$0,\!01$	$0,\!01$	$0,\!01$
	Rotkappe	< 0,01	$< 0,\!01$	0,01	$0,\!01$	$0,\!01$	$0,\!01$
Beeren	Heidelbeeren	0,23	0,41	0,59	$0,\!59$	$0,\!55$	0,32
	Walderdbeeren	0,02	0,04	0,06	$0,\!06$	$0,\!06$	$0,\!03$
	Waldhimbeeren	0,02	0,04	0,06	$0,\!06$	$0,\!06$	$0,\!03$
	Preiselbeeren	0,02	0,04	0,06	$0,\!06$	$0,\!06$	$0,\!03$
	Hauserdbeeren	0,01	0,01	0,02	$0,\!02$	$0,\!02$	$0,\!01$
	Haushimbeeren	0,01	0,01	0,02	$0,\!02$	$0,\!02$	$0,\!01$
Fleisch	Muskel (Schwein)	4,1	10,5	40,6	52,7	64,9	73,0
Fisch		1,2	7,3	7,3	$11,\!0$	12,2	18,3
Kartoffeln		100	133	149	183	183	183
Wurzelgemüse	Rote Bete	5,0	6,6	7,5	9,1	9,1	9,1
	Möhren	5,0	6,6	7,5	9,1	9,1	9,1
Blattgemüse	Kohl	3,2	6,3	7,4	$_{9,5}$	$11,\!6$	13,7
	Kopfsalat	1,1	2,1	2,5	3,2	3,9	4,6
Getreide	Hafer	4,0	10,0	26,5	31,5	$_{36,5}$	$_{36,5}$
	Mais	4,0	10,0	$26,\!5$	31,5	$_{36,5}$	$_{36,5}$
	Roggen	4,0	10,0	26,5	$31,\!5$	$_{36,5}$	$_{36,5}$
	Weizen	4,0	10,0	26,5	$31,\!5$	$_{36,5}$	$_{36,5}$
Gurken		1,7	5,7	10,0	11,6	11,6	13,3
Tomaten		1,7	5,7	$10,\!0$	$11,\!6$	$11,\!6$	$13,\!3$
Erbsen		1,7	5,7	10,0	$11,\!6$	$11,\!6$	$13,\!3$

Tabelle 6.9: Für Monte-Carlo-Simulationen angenommene Verzehrsmengen.

6.2.2 Retentionsfaktoren der Zubereitung

In Bezug auf die Retentionsfaktoren stellt sich das Problem, dass keine Informationen darüber vorliegen, welche Zubereitungsarten von der Bevölkerung Christinowkas bevorzugt angewendet werden. Diese Unsicherheit kommt zum Ausdruck, indem im Zweifelsfall verschiedenen möglichen Zubereitungsarten die gleiche Bedeutung zugemessen wird. Lagen keine oder unzureichende Informationen über Retentionsfaktoren bestimmter Lebensmittel vor, so wurde ein Retentionsfaktor $r_n = 1$ als konservative Abschätzung angenommen.

Tabelle 6.10 gibt eine Übersicht über die verwendeten Retentionsfaktoren. War in [TRS94] ein Erwartungswert mit einem Schwankungsbereich angegeben, so wurde für diese Größe eine Dreiecksverteilung mit dem Erwartungswert als wahrscheinlichstem Wert angenommen. War nur ein Schwankungsbereich angegeben, so wurde eine Rechtecksverteilung angenommen. Mit einem Punktschätzer musste gearbeitet werden, wenn nur ein Erwartungswert, nicht aber ein Schwankungsbereich angegeben war.

				Retent	tions faktor
Lebensmittel	Unterkategorie	Zubereitungsart	Anteil	\mathbf{EW}	Bereich
Milch	Beide	k. A.	1	1	
Pilze	Alle	Ankochen	1/2	k. A.	0,1-0,4
		Einweichen nach Trocknung	1/2	k. A.	0,1-0,2
Beeren	Erdbeeren	Abspülen	1	$0,\!6$	k. A.
	Sonstige	Abspülen	1	$0,\!8$	k. A.
Fleisch		Kochen	1/2	$0,\!4$	0,2-0,7
		Braten, Rösten oder Grillen	1/2	k. A.	0,5-0,8
Fisch		Kochen	1/2	0,7	0,2-0,9
		Braten	1/2	k. A.	$0,\!8\!-\!0,\!9$
Kartoffeln		Kochen mit Schale	1/2	k. A.	0,8-0,9
		Schälen und Kochen	1/2	$0,\!6$	k. A.
Wurzelgemüse	Rote Bete	Schälen	1/3	k. A.	$0,\!4-\!0,\!7$
		Ungeschält kochen	1/3	k. A.	0,3-0,7
		Kochen und Schälen	1/3	$0,\!3$	k. A.
	Möhren	Schälen	1/2	$0,\!5$	k. A.
		Ungeschält kochen	1/2	k. A.	0,5-0,8
Blattgemüse	Kohl	Waschen	1	0,9	k. A.
	Kopfsalat	Entfernen nicht-essbarer Teile	1	$0,\!5$	k. A.
Getreide	Roggen	Kochen von Keimen	1/2	k. A.	$0,\!8\!-\!0,\!9$
		Sonstige	1/2	1	
	Weizen	Kochen von Keimen	1/2	0,9	k. A.
		Sonstige	1/2	1	
	Sonstige	k. A.	1	1	
Sonstige		Sonstige / k. A.	1	1	

Tabelle 6.10: Für Monte-Carlo-Simulationen angenommene Retentionsfaktoren der Zubereitung [TRS94]. (,k. A.' steht für ,keine Angabe'.)

6.2.3 Cäsium-137-Gehalte in Lebensmitteln

Die für die Monte-Carlo-Simulationen verwendeten geometrischen Mittelwerte und Standardabweichungen der spezifischen Aktivitäten der Lebensmittel sind in Tabelle 6.11 zusammengestellt. Als Verteilung wurde in allen Fällen eine Lognormalverteilung angenommen. Die Daten entstammen den jeweils genannten Tabellen aus Abschnitt 4.1.2. Die mit * gekennzeichnete geometrische Standardabweichung der spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivität in Preiselbeeren ist eine Annahme auf der Grundlage der geometrischen Standardabweichungen der anderen Waldbeeren, da nur eine Preiselbeerprobe vorlag.

Genaue Informationen zu weiteren Parametern der Monte-Carlo-Simulationen wurden bereits in Abschnitt 5.1.1 aufgeführt.

Lebensmittel	Siehe Tabelle	Unterkategorie	Bezug	GM	GS
Milch	4.1	Kuhmilch	\mathbf{FM}	31	2,5
		Ziegenmilch	\mathbf{FM}	$13,\!5$	$1,\!6$
Pilze	4.21	Steinpilze	TM	29661	2,5
		Butterpilze	TM	759709	2,6
		Pfifferlinge	TM	10331	3,6
		Birkenpilze	TM	128698	6,5
		Rotkappe	TM	17970	6,7
Beeren	4.18	Heidelbeeren	TM	35470	4,2
		Walderdbeeren	TM	1317	4,5
		Waldhimbeeren	TM	4535	4,8
		Preiselbeeren	TM	42873	$4,\!5^{*}$
		Hauserdbeeren	TM	53	2,7
		Haushimbeeren	TM	325	2,2
Fleisch	4.5	Muskel (Schwein)	\mathbf{FM}	34	1,9
Fisch	4.6		\mathbf{FM}	99	2,1
Kartoffeln	4.11		\mathbf{FM}	8,9	2,0
Wurzelgemüse	4.11	Rote Bete	\mathbf{FM}	8	3,7
		Möhren	\mathbf{FM}	9,2	2,2
Blattgemüse	4.13	Kohl	\mathbf{FM}	7,5	$1,\!6$
		Kopfsalat	\mathbf{FM}	32	1,7
Getreide	4.9	Hafer	\mathbf{FM}	$23,\!5$	$1,\!3$
		Mais	\mathbf{FM}	5,4	2,2
		Roggen	\mathbf{FM}	14	2,4
		Weizen	\mathbf{FM}	6,5	$1,\!3$
Gurken	4.15		\mathbf{FM}	5,7	1,8
Tomaten	4.15		\mathbf{FM}	6	2,7
Erbsen	4.15		\mathbf{FM}	8	$_{3,9}$

Tabelle 6.11: Für Monte-Carlo-Simulationen verwendete spezifische Aktivitäten unterschiedlicher Lebensmittel. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

6.3 Modellierungen

6.3.1 Direkte Modellierung

Die Modellierung gemäß (6.2) und mit den Parametern der Tabellen 6.1, 6.9, 6.10 und 6.11 liefert die in Tabelle 6.12 genannten Ergebnisse. Die Verwendung der Abkürzungen folgt dabei den bereits in den vorangegangenen Kapiteln verwendeten Konventionen. Die neuen Bezeichnungen ,P95' bzw. ,MO' stehen für das 95%-Perzentil bzw. den Modus der jeweiligen Verteilung. Die Werte der Spalte ,Gew.' beziehen sich auf eine altersabhängige Gewichtung gemäß [UNS00], wobei die Altersklasse ,1–2 a' zu 5% einfliesst sowie die Altersklassen ,7–12 a' bzw. ,> 17 a' zu 30% bzw. 65%.

Tabelle 6.12: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosis gemäß im Rahmen dieser Arbeit ermittelter spezifischer ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln. Alle Angaben in mSv a^{-1} .

	$\leq 1 \mathrm{a}$	1-2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$12 - 17 \mathrm{a}$	$> 17\mathrm{a}$	Gew.
EW	0,60	$0,\!68$	0,86	$0,\!95$	$1,\!19$	$0,\!93$	0,93
VB	0,12-2,53	$0,\!16\!-\!2,\!54$	$0,\!20\!-\!3,\!21$	$0,\!24\!-\!3,\!43$	$0,\!31\!-\!4,\!19$	$0,\!28\!-\!2,\!94$	$0,\!26\!-\!3,\!05$
P95	1,71	1,78	$2,\!25$	$2,\!42$	$2,\!98$	$2,\!20$	2,24
ME	$0,\!37$	$0,\!46$	$0,\!58$	$0,\!65$	$0,\!83$	0,71	$0,\!68$
MO	0,22	$0,\!31$	$0,\!38$	$0,\!43$	$0,\!58$	$0,\!50$	$0,\!48$
GM	0,41	$0,\!50$	$0,\!63$	0,71	$0,\!90$	0,75	0,73
GS	2,2	2,0	2,0	2,0	$1,\!9$	$1,\!8$	1,9

In den sieben hier aufgeführten, aber auch allen noch folgenden Fällen erwies sich eine Lognormalverteilung als bester Fit, wobei sich jedoch jeweils ein *p*-Wert des χ^2 -Tests von < 0,01 ergab. Der stets genannte geometrische Mittelwert und die geometrische Standardabweichung beziehen sich auf diese gefittete Lognormalverteilung.

Dass es sich bei den Verteilungen der Simulationen nicht um perfekte Lognormalverteilungen handeln kann, zeigen neben dem p-Wert auch die leichten Unterschiede zwischen Median und geometrischem Mittel sowie Abb. 6.1, in der die simulierte Verteilung zu Tabelle 6.12 für Erwachsene (> 17 a) zu sehen ist. Dabei zeigt sich, dass der Modus der gefitteten Verteilung etwas weniger ausgeprägt ist, dafür aber größere Wahrscheinlichkeiten für sehr kleine und große Dosiswerte vorliegen als bei der simulierten Verteilung. Dieses Charakteristikum zeigte sich bei allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zur Ingestionsdosis.

Eine auf den geometrischen Mittelwerten der Eingabeparameter beruhende Abschätzung der Beiträge unterschiedlicher Lebensmittel zur gesamten Effektiven Ingestionsdosis pro Jahr zeigt Abb. 6.2. Die dazugehörigen Zahlenwerte und die jährliche ¹³⁷Cs-Aktivitätsaufnahme durch Ingestion der unterschiedlichen Lebensmittel können Tabelle 6.13 entnommen werden.



Abbildung 6.1: Verteilung der Effektiven Ingestionsdosis für Erwachsene (zu Tabelle 6.12) mit gefitteter Lognormalverteilung (durchgezogene Linie). Der Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 % ist rot markiert.



Abbildung 6.2: Anteile der unterschiedlichen Lebensmittel an der Ingestionsdosis (zu Tabelle 6.12), basierend auf den geometrischen Mittelwerten der ¹³⁷Cs-Gehalte in Lebensmitteln.

Dabei wird deutlich, dass für Kinder und Jugendliche der Verzehr von Beeren den größten Beitrag zur Ingestionsdosis liefert. Dass gemäß Tabelle 6.12 die höchste Ingestionsdosis für 12–17-jährige zu erwarten ist, liegt am im Vergleich zu Erwachsenen höheren angenommenen Beerenverzehr (siehe Tabelle 6.9). Pilze liefern nach Tabelle 6.13 nur für die Altersgruppe der über 17-jährigen den höchsten Beitrag zur Gesamtdosis.

Tabelle 6.13: ¹³⁷Cs-Aktivitätsaufnahme in kBq a⁻¹(jeweils linke Spalte) und Anteil an der gesamten Effektiven Ingestionsdosis pro Jahr in % (jeweils rechte Spalte) bezogen auf die unterschiedlichen Lebensmittel (zu Tabelle 6.12).

	\leq	$1\mathrm{a}$	1-	$2\mathrm{a}$	2-	7 a	7-1	$12\mathrm{a}$	12-	$17\mathrm{a}$	> 1	7a
Pilze	2,0	16,2	6,8	$23,\!4$	12,1	$28,\!8$	14,1	$31,\!0$	14,1	31,7	16,1	42,3
Beeren	7,4	$59,\!5$	$13,\!3$	$45,\!5$	19,2	$45,\!8$	19,2	$42,\!3$	17,7	$39,\!8$	10,3	27,1
Gemüse u.	$0,\!9$	7,6	1,6	5,4	2,6	6,2	3,1	$6,\!9$	3,4	7,6	3,4	$_{9,0}$
Getreide												
Fleisch u.	$_{0,2}$	$1,\!3$	0,7	2,6	$1,\!3$	3,1	1,8	$_{3,9}$	2,1	4,7	2,7	7,1
Fisch												
Milch	$1,\!9$	$15,\!3$	6,8	$23,\!2$	6,8	16,1	7,2	$15,\!9$	7,2	16,2	5,5	$14,\!4$
Gesamt	12,4		29,2		42,0		45,4		44,5		38,0	

Zum Vergleich wurde die Simulation nochmals unter Vernachlässigung der Abnahme der spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivität durch die Lebensmittelzubereitung durchgeführt. Dabei wurde also der Wert 1 für alle Retentionsfaktoren angenommen. Die in Tabelle 6.14 aufgeführten Ergebnisse untersteichen die Bedeutung dieses Aspekts der Modellierung, da sich so um mehr als einen Faktor 2 höhere Werte für die Ingestionsdosis ergeben.

Tabelle 6.14: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosis gemäß im Rahmen dieser Arbeit ermittelter spezifischer ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln (ohne Berücksichtigung von Retentionsfaktoren). Alle Angaben in mSv a⁻¹.

	$\leq 1 \mathrm{a}$	1-2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	12 - 17 a	$> 17\mathrm{a}$	Gew.
EW	1,00	1,29	1,77	2,03	2,58	$2,\!44$	2,26
VB	0,23 - 3,61	$0,\!33\!-\!4,\!25$	$0,\!44\!-\!5,\!85$	$0,\!51\!-\!6,\!64$	$0,\!67\!-\!8,\!36$	$0,\!64\!-\!7,\!91$	$0,\!59\!-\!7,\!34$
P95	2,59	$3,\!20$	$4,\!44$	$5,\!07$	6,40	$6,\!08$	$5,\!61$
ME	$0,\!69$	$0,\!96$	$1,\!30$	$1,\!51$	1,93	$1,\!83$	1,70
MO	0,47	$0,\!66$	$0,\!89$	$0,\!98$	1,29	$1,\!21$	$1,\!14$
GM	0,74	$1,\!01$	$1,\!37$	$1,\!59$	2,04	$1,\!94$	1,79
GS	2,0	$1,\!9$	$1,\!9$	$1,\!9$	$1,\!9$	$1,\!9$	$1,\!9$

6.3.2 Modellierung mit Daten aus den Jahren 1998/99

Eine weitere Monte-Carlo-Simulation sollte für die im Rahmen von [Bot00] erhaltenen spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln durchgeführt werden. Wie bereits erwähnt, beziehen sich diese auf Messungen von Proben aus Christinowka aus den Jahren 1998/99. Die Werte sind in Tabelle 6.15 aufgelistet, wobei die kursiv dargestellten Einträge der geometrischen Standardabweichung Schätzwerte sind, da [Bot00] keine diesbezüglichen Angaben entnommen werden konnten. In allen Fällen wurde eine Lognormalverteilung angenommen.

Die gemäß Tabelle 6.9 nach den jeweiligen Unterkategorien unterschiedenen Verzehrsgewohnheiten für Milch, Beeren, Wurzelgemüse, Blattgemüse und Getreide wurden für diese Simulation jeweils zu einem Wert zusammengeführt. Für Wurzelgemüse wurde mit den Retentionsfaktoren für Möhren gearbeitet, bei Getreide wurde ein Retentionsfaktor mit dem Wert 1 angenommen.

Tabelle 6.15: [Bot00] entnommene spezifische 137 Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

Lebensmittel	Unterkategorie	Bezug	GM	GS
Milch	Kuhmilch	\mathbf{FM}	9	1,6
Pilze	Steinpilze	TM	170000	1,6
	Butterpilze	TM	1120000	2
	Pfifferlinge	TM	314000	2
	Birkenpilze	TM	182000	2
	Rotkappe	TM	30200	1,3
Beeren	Waldbeeren	TM	1500	2,5
Fleisch		\mathbf{FM}	20	2,5
Fisch		\mathbf{FM}	12	2,5
Kartoffeln		\mathbf{FM}	9,1	2,5
Wurzelgemüse	Rüben	\mathbf{FM}	3,8	2,5
Blattgemüse	Kohl	\mathbf{FM}	$1,\!5$	2,5
Getreide		\mathbf{FM}	$0,\!3$	2,5

Die Ergebnisse dieser Modellierung können Tabelle 6.16 entnommen werden. Abb. B.34 auf Seite 198 zeigt die Verteilung der Effektiven Ingestionsdosis für Erwachsene samt gefitteter Lognormalverteilung. Dabei fällt die im Vergleich zur Verteilung aus Abb. 6.1 etwas geringere geometrische Standardabweichung auf. Vergleichbar zu jener Verteilung ist aber das Verhältnis der gefitteten Lognormalverteilung zur simulierten Verteilung.

Die Ergebnisse für diese Modellierung liegen nur wenig höher als die in Tabelle 6.2 genannten Werte. So ergaben die Ganzkörpermessungen für erwachsene Männer mit "typischem" Verhalten eine Effektive Ingestionsdosis pro Jahr von $0.45 \cdot 1.4^{\pm 1} \text{ mSv a}^{-1}$, was einem geometrischen Mittelwert von 0.52 mSv a^{-1} aus dieser Modellierung gegenüberzustellen ist.

Signifikanter sind die Abweichungen zu der Modellierung gemäß Tabelle 6.12, die zum Teil
um mehr als einen Faktor 2 höhere Erwartungswerte lieferte. Die Diskrepanzen zwischen diesen Modellierungen sind jedoch nicht in den geringfügig unterschiedlichen Annahmen für Verzehrsgewohnheiten und Retentionsfaktoren begründet, zumal sich diese insbesondere auf Lebensmittel wie Gemüse und Getreide bezogen, also solche mit einem sehr geringen Beitrag zur Gesamtdosis. Wesentlich sind vielmehr die deutlichen Unterschiede zwischen den spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Pilzen und Beeren (Tabellen 6.11 und 6.15). Dies unterstreicht auch Abb. 6.3. Demzufolge tragen bei der Modellierung gemäß Tabelle 6.16 die Pilze für alle Altersgruppen den mit Abstand größten Teil zur gesamten Ingestionsdosis bei. Dies steht im Kontrast zu Abb. 6.2, in der ein wesentlich größerer relativer Einfluss der Beeren erkennbar ist.

	$\leq 1 \mathrm{a}$	1-2a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$12 - 17 \mathrm{a}$	$> 17\mathrm{a}$	Gew.
EW	0,15	0,23	0,34	0,41	0,53	$0,\!58$	0,51
VB	$0,\!07\!-\!0,\!33$	$0,\!10\!-\!0,\!53$	$0,\!14\!-\!0,\!79$	$0,\!16\!-\!0,\!96$	$0,\!21\!-\!1,\!25$	$0,\!23\!-\!1,\!40$	$0,\!20\!-\!1,\!23$
P95	0,28	$0,\!45$	$0,\!66$	$0,\!80$	$1,\!04$	$1,\!17$	1,02
ME	0,13	$0,\!21$	$0,\!29$	$0,\!35$	0,46	$0,\!50$	$0,\!44$
MO	0,11	$0,\!17$	$0,\!23$	$0,\!28$	0,37	$0,\!39$	$0,\!35$
GM	0,14	$0,\!21$	$0,\!30$	0,36	$0,\!48$	$0,\!52$	$0,\!46$
GS	1,5	1,5	$1,\!6$	$1,\!6$	$1,\!6$	$1,\!6$	$1,\!6$

Tabelle 6.16: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosis gemäß im Rahmen von [Bot00] ermittelten spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten in Lebensmitteln. Alle Angaben in mSv a^{-1} .

6.3.3 Modellierung mit Transferfaktoren

Bei der Modellierung mit Transferfaktoren gingen die Retentionsfaktoren und Verzehrsgewohnheiten gemäß den Tabellen 6.9 und 6.10 ein.

Für Fische und Fleisch wurden keine Transferfaktoren berücksichtigt, für alle anderen Materialien bis auf Milch, Pilze und Beeren ausschließlich auf Böden bezogene. Als Ausgangskompartimente für den Transfer von ¹³⁷Cs in Milch fanden gemäß Abschnitt 5.1.2 Gras und Heu Berücksichtigung.

Wie in den Abschnitten 5.2.7 und 5.2.8 diskutiert, ist in Bezug auf Beeren und Pilze unklar, welches Ausgangskompartiment (Boden oder Organische Auflage) ausgewählt werden sollte. Daher ergeben sich vier Möglichkeiten, eine Ingestionsdosismodellierung mit Transferfaktoren durchzuführen. Tabelle 6.17 gibt eine Übersicht über die Verbindungen der verschiedenen Lebensmittel zu Bezugsmaterialien, wobei den aufgeführten Tabellen die spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten bzw. Transferfaktoren zu den jeweiligen Bezugsmaterialien zu entnehmen sind.



Abbildung 6.3: Anteile der unterschiedlichen Lebensmittel an der Ingestionsdosis (zu Tabelle 6.16), basierend auf geometrischen Mittelwerten der ¹³⁷Cs-Gehalte in Lebensmitteln.

Tabelle 6.17: Lebensmittel und Bezugsmaterialien fü	ir die Modellierung der Ingestionsdosis
anhand von Transferfaktoren.	

		Tabelle	n
Lebensmittel	Bezugsmaterial	Spezifische Aktivität	Transferfaktor
Milch	Gras und Heu	4.7	5.2 und 5.3
Pilze	Boden	4.25	5.19
	Organische Auflage	4.23	5.21
Beeren	Boden	4.25	5.15
	Organische Auflage	4.20	5.17
Kartoffeln	Boden	4.25	5.9
Wurzelgemüse	Boden	4.25	5.9
Blattgemüse	Boden	4.25	5.11
Getreide	Boden	4.25	5.6
Gurken	Boden	4.25	5.13
Tomaten	Boden	4.25	5.13
Erbsen	Boden	4.25	5.13

Die Tabellen 6.18–6.21 geben eine Übersicht über die Ergebnisse der vier anhand von Transferfaktoren durchgeführten Modellierungen. Jedes der vier Szenarios liefert größere geometrische Standardabweichungen der gefitteten Lognormalverteilung und deutlich größere Vertrauensbereiche zu einem Vertrauensniveau von 95 % als Tabelle 6.12 zu entnehmen ist. Dies verdeutlicht auch Abb. B.35 auf Seite 198, die die simulierte Verteilung für Erwachsene (zu Tabelle 6.18) nebst gefitteter Lognormalverteilung zeigt. Die größere Variabilität resultiert in höheren Erwartungswerten. Die Unterschiede sind am stärksten ausgeprägt, falls für Pilze die organische Auflage als Bezugsmaterial verwendet wird (Tabellen 6.19 und 6.21).

					-		
	$\leq 1 a$	1-2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$1217\mathrm{a}$	$> 17\mathrm{a}$	Gew.
EW	1,27	1,40	1,74	1,89	2,34	1,73	1,76
VB	0,11-7,00	$0,\!14\!-\!7,\!09$	$0,\!18\!-\!8,\!71$	$0,\!22\!-\!9,\!27$	$0,\!28\!-\!11,\!32$	$0,\!26\!-\!7,\!69$	$0,\!25\!-\!8,\!10$
P95	4,06	4,33	5,32	5,70	$6,\!99$	5,02	5,16
ME	0,48	$0,\!61$	0,77	0,87	1,11	$0,\!93$	$0,\!90$
GM	0,56	$0,\!69$	$0,\!87$	0,98	$1,\!25$	$1,\!04$	$1,\!01$
\mathbf{GS}	2,9	2,7	2,7	2,6	2,6	2,4	2,5

Tabelle 6.18: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosis mit Verwendung von Transferfaktoren. Transferpfade für Beeren und Pilze: Boden-Beeren und Boden-Pilze. Alle Angaben in mSv a^{-1} .

Tabelle 6.19: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosismit Verwendung von Transferfaktoren. Transferpfade für Beeren und Pilze:Boden-Beeren und Organische Auflage-Pilze. Alle Angaben in mSv a⁻¹.

	$\leq 1\mathrm{a}$	1-2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$12 - 17 \mathrm{a}$	$> 17 \mathrm{a}$	Gew.
\mathbf{EW}	1,74	$2,\!23$	$3,\!01$	$3,\!44$	4,36	4,04	3,77
VB	$0,\!12\!-\!8,\!7$	$0,\!15\!-\!10,\!0$	$0,\!20\!-\!13,\!3$	$0,\!2314,\!9$	$0,\!30\!-\!18,\!6$	$0,\!28\!-\!15,\!7$	0,26-15,2
P95	$5,\!09$	$6,\!04$	7,88	8,75	$10,\!97$	9,12	8,88
ME	$0,\!58$	0,76	$0,\!97$	$1,\!10$	1,40	1,20	$1,\!15$
GM	$0,\!67$	$0,\!86$	$1,\!10$	1,25	$1,\!60$	$1,\!38$	1,32
GS	$_{3,0}$	2,9	$_{3,0}$	2,9	$2,\!9$	$2,\!9$	2,9

	$\leq 1 \mathrm{a}$	1-2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$1217\mathrm{a}$	$> 17 \mathrm{a}$	Gew.
EW	1,07	1,21	$1,\!49$	1,64	2,04	$1,\!55$	1,56
VB	0,20-4,04	$0,\!24\!-\!4,\!42$	$0,\!31\!-\!5,\!40$	$0,\!35\!-\!5,\!85$	$0,\!45-\!7,\!21$	$0,\!37\!-\!5,\!33$	$0,\!36\!-\!5,\!39$
P95	2,97	$3,\!27$	$4,\!01$	$4,\!35$	$5,\!39$	$4,\!00$	4,06
ME	0,72	$0,\!83$	$1,\!04$	$1,\!15$	$1,\!44$	$1,\!12$	$1,\!12$
GM	0,76	$0,\!88$	$1,\!10$	$1,\!22$	$1,\!53$	$1,\!19$	$1,\!19$
GS	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0

Tabelle 6.20: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosis mit Verwendung von Transferfaktoren. Transferpfade für Beeren und Pilze: Organische Auflage-Beeren und Boden-Pilze. Alle Angaben in mSv a⁻¹.

Tabelle 6.21: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Effektive Ingestionsdosis mit Verwendung von Transferfaktoren. Transferpfade für Beeren und Pilze: Organische Auflage-Beeren und Organische Auflage-Pilze. Alle Angaben in mSv a^{-1} .

	$\leq 1\mathrm{a}$	1 - 2 a	$27\mathrm{a}$	$712\mathrm{a}$	$12 17 \mathrm{a}$	$> 17 \mathrm{a}$	Gew.
EW	$1,\!62$	2,20	$3,\!03$	$3,\!50$	4,46	4,32	$3,\!97$
VB	$0,\!22\!-\!5,\!49$	$0,\!26\!-\!6,\!85$	$0,\!33\!-\!9,\!16$	$0,\!37\!-\!10,\!43$	$0,\!4713,\!15$	$0,\!39\!-\!12,\!43$	$0,\!38\!-\!11,\!46$
P95	3,70	$4,\!51$	$5,\!88$	$6,\!59$	8,29	7,34	$6,\!93$
ME	$0,\!82$	$0,\!97$	$1,\!24$	$1,\!37$	1,73	1,38	$1,\!36$
GM	$0,\!88$	$1,\!05$	$1,\!35$	1,51	$1,\!90$	1,55	$1,\!52$
GS	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,4

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Modellierungen für unterschiedliche Jahre im Hinblick auf gesetzliche Grenzwerte

Einer Diskussion bedarf der Vergleich der Resultate der Abschnitte 6.3.1 und 6.3.2. So konnten mit der Modellierung im letztgenannten Abschnitt die Ergebnisse aus [Bot00], die sich auf die Jahre 1998/99 beziehen, bestätigt werden. Die Modellierung mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit vermessenen Lebensmittelproben ergab höhere Erwartungswerte für die jährliche Effektive Ingestionsdosis. Diese Ergebnisse beziehen sich allerdings auf den 01.01.2003.

Es ist bemerkenswert, dass die für einen vier bis fünf Jahre späteren Zeitpunkt vorgenommene Modellierung 1,5–2-fach höhere Erwartungswerte der Ingestionsdosis (bezogen auf Jugendliche und Erwachsene) liefert. Die Erwartungswerte aus Tabelle 6.12 liegen für Erwachsene mit 0,93 mSv a⁻¹ bzw. für Jugendliche mit 1,19 mSv a⁻¹ nur geringfügig unter bzw. sogar über dem Wert von 1 mSv a⁻¹. Dieser Wert ist als gesetzlicher Grenzwert für die maximale zusätzliche Effektive Dosis pro Jahr für Einzelpersonen der Bevölkerung der Ukraine festgelegt [Law01]. Aus diesem für eine Unfallsituation recht niedrigen Grenzwert ergeben sich Probleme bei der Regulation. So liegen zwar die Ergebnisse der Tabellen 6.12 und 6.16 noch im Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenexposition in Europa, und auch für 12–17-jährige ist gemäß erstgenannter Modellierung für 95 % dieser Bevölkerungsgruppe eine zusätzliche Effektive Ingestionsdosis durch ¹³⁷Cs pro Jahr von unter 3 mSv a^{-1} zu erwarten, eine Überschreitung des Grenzwertes von 1 mSv a^{-1} ist aber für Teile der Bevölkerung Christinowkas und vermutlich auch andere Orte der Gegend bereits aufgrund der Ingestion von ¹³⁷Cs anzunehmen.

Bei der Bewertung des Grenzwertes ist desweiteren die Exposition durch andere Nuklide aus dem Fallout, wie z. B. ⁹⁰Sr oder Plutoniumisotope, zu berücksichtigen. So wurde in [Mew04] die zusätzliche Effektive Dosis durch ⁹⁰Sr für erwachsene Bewohner Christinowkas auf 0,38 mSv a⁻¹ abgeschätzt. Für Jugendliche (12–17 a) wird ebenda sogar eine Dosisleistung von etwa 1 mSv a⁻¹ angegeben. Eine auf konservativen Annahmen beruhende Monte-Carlo-Simulation zu der internen Exposition durch ⁹⁰Sr lieferte einen Erwartungswert von 0,6 mSv a⁻¹ für Erwachsene.

Eine weitere Verschärfung der Problematik des Grenzwerts von 1 mSv a^{-1} wird durch die Berücksichtigung anderer Expositionspfade bewirkt. So wird in [Bot00] für die externe Strahlenexposition durch ¹³⁷Cs in den Jahren 1998/99 für Erwachsene mit normalen Verhaltensweisen der Wert $0,49 \cdot 1,9^{\pm 1} \text{ mSv a}^{-1}$ genannt. Für die beiden untersuchten Männer mit "extremem" Verhalten ergaben sich $1,0 \text{ mSv a}^{-1}$ bzw. $3,6 \text{ mSv a}^{-1}$.

Zur internen Strahlenexposition durch ¹³⁷Cs trägt neben der Ingestion durch Lebensmittel auch die Direktingestion von Boden bei. Zur Abschätzung der dadurch bewirkten Dosis sind Kenntnisse über die Aufenthaltszeiten im Freien sowie Bodenaufnahmeraten bei Aufenthalt im Freien notwendig. Informationen über diese Größe liegen in Bezug auf die Bevölkerung Christinowkas, bzw. ländlicher Gegenden in Osteuropa im allgemeinen, nicht vor. Für gewöhnlich sind die höchsten Bodenaufnahmeraten jedoch für die Altersgruppe der 1–2-jährigen zu erwarten. Für eine vermutlich nur recht grobe, aber womöglich dennoch informative Abschätzung der Relevanz dieses Aspektes bietet es sich daher z. B. an, eine Modellierung anhand für Deutschland vorliegender Angaben der genannten benötigten Parameter vorzunehmen. Diese können z.B. [Vah04b] entnommen werden.³ Mit diesen Annahmen und der in Tabelle 4.25 (ab Seite 93) aufgeführten spezifischen 137 Cs-Aktivität in Boden (GM: 2756 Bq kg⁻¹, GS: 2,8 Bq kg⁻¹) liefert die Monte-Carlo-Simulation für die durch ¹³⁷Cs bedingte Effektive Dosis pro Jahr durch Direktingestion von Boden für 1–2-jährige eine Verteilung mit dem Erwartungswert $0,007\,\mathrm{mSv}\,\mathrm{a}^{-1}$ und einem 95 %-Perzentil von $0.024 \,\mathrm{mSv} \,\mathrm{a}^{-1}$, für die sich eine Lognormalverteilung als bester Fit erwies (GM: 0,004 mSv a⁻¹, GS: 3,0 mSv a⁻¹). Der Vergleich dieser Werte mit denen für die Ingestion von Lebensmitteln deutet darauf hin, dass der Direktingestion durch Boden bei der internen Strahlenexposition durch ¹³⁷Cs in diesem Fall keine große Bedeutung zukommt. Für die Altersgruppe der 1-2-jährigen erwies sich dieser Expositionspfad bei der Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide in Niedersachsen gemäß [Vah04b] als nicht vernachlässigbar.

³Für die Aufenthaltszeit im Freien wird in [Vah04b] eine bei 718 h a⁻¹ und 4814 h a⁻¹ abgeschnittene Normalverteilung mit einem arithmetischen Mittelwert von 2766 h a⁻¹ und einer arithmetischen Standardabweichung von 1400 h a⁻¹ angegeben. Für die Bodenaufnahmerate der 1–2-jährigen wird ein [BGB] entnommener Wert von $5 \cdot 10^{-5}$ kg h⁻¹ genannt.

Modellierung mit Transferfaktoren

Die in Abschnitt 6.3.3 genannten Ergebnisse werfen im Vergleich zu den Ergebnissen aus Tabelle 6.12 die Frage nach der Güte radioökologischer Modelle auf, die ausschließlich mit Transferfaktoren arbeiten. Dies gilt insbesondere für den vorliegenden Fall sehr inhomogener Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen, wie sie bei den untersuchten Waldbeeren und Pilzen vorliegen.

Für Dosisabschätzungen ist dabei von besonderer Bedeutung, dass sich bei der ländlichen Bevölkerung Christinowkas Inhomogenitäten bei den Aktivitätsgehalten stärker auf die Ingestionsdosis übertragen als bei der industrialisierten Bevölkerung nach westlichem Muster, da sich, anders als in der Regel im letztgenannten Fall, die Menschen in Christinowka direkt von den selbst erzeugten und gesammelten Lebensmitteln ernähren.

Die große Variabilität der zu berücksichtigenden Transferfaktoren bewirkt letztlich eine signifikante Überschätzung der Ingestionsdosis. Zumindest für Situationen wie in der Zone II um Tschernobyl erscheint daher für aussagekräftige Abschätzungen der Ingestionsdosis die direkte Überwachung der Nahrungsmittel auf ihren Aktivitätsgehalt gegenüber der Modellierung anhand von Transferfaktoren als wesentlich sinnvoller.

7 Zusammenfassung und Ausblick

- In dieser Arbeit konnten Untersuchungen zu den spezifischen Aktivitäten der Radionuklide ¹³⁷Cs und ⁴⁰K in verschiedenen Lebensmitteln, Pflanzen und Böden aus dem ukrainischen Ort Christinowka und seiner Umgebung weitergeführt werden. Besonders hohe ¹³⁷Cs-Gehalte wurden dabei in Waldbeeren, Pilzen und Organen von in Wäldern lebenden Tieren (Wildschweine und Rehe) gefunden. Vergleichsweise niedrige ¹³⁷Cs-Aktivitätskonzentrationen zeigten Getreideproben und solche von Hausschweinen. Die höchsten Werte für die spezifische Aktivität von ⁴⁰K ergaben Messungen von Gemüseproben.
- Für den Gehalt dieser Nuklide in bestimmten Probenmaterialien konnte die Annahme einer Lognormalverteilung oft bestätigt werden. Für ¹³⁷Cs zeigten sich dabei in der Auswertung anhand von QQ-Plots jedoch in einigen Fällen Hinweise auf mehrere zugrunde liegende Teilgesamtheiten. Dies gilt insbesondere für aus den Wäldern stammende Probenmaterialien und Gras. Im letztgenannten Fall fanden sich, auch unter Berücksichtigung der Kuhmilchproben, Hinweise auf unterschiedlich mit ¹³⁷Cs kontaminierte Weidegründe.
- Messungen mit deutlich längeren Messzeiten von 32 vergleichsweise gering mit ¹³⁷Cs belasteten Bodenproben lieferten keine erhöhten spezifische Aktivitäten von drei Radiumisotopen.
- Aufgrund des umfangreichen Datensatzes, der zum Teil auch recht viele Proben gleichen Materials beinhaltet, konnte der Transfer von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K zwischen einigen Kompartimenten untersucht werden. Ebenso wie für die spezifischen Aktivitäten konnte auch für die Transferfaktoren die Annahme einer Lognormalverteilung in vielen Fällen nicht abgelehnt werden.
- Die in dieser Arbeit ermittelten Transferfaktoren zeigen in der Regel eine gute Übereinstimmung mit Literaturangaben. Eine Ausnahme stellen dabei die hochkontaminierten Beeren und Pilze dar, für die in der Literatur zum Teil wesentlich geringere ¹³⁷Cs-Transferfaktoren genannt werden als die, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurden. Besonders gute Übereinstimmungen konnten bei dem Vergleich mit Werten aus [TRS94], die sich auf Ton- und Lehmböden beziehen, festgestellt werden.
- In der Regel zeigten sich für ⁴⁰K höhere Transferfaktoren als für ¹³⁷Cs. Dies gilt jedoch nicht für die besonders hoch mit ¹³⁷Cs kontaminierten Lebensmittel Beeren und Pilze.
- Beim Transfer von ⁴⁰K spielt der Effekt der Homöostase eine Rolle, der anhand des Transfers in Gras und Getreide nachvollzogen werden konnte. Für ¹³⁷Cs konnte in diesen Fällen keine Abhängigkeit des Transferfaktors von der Aktivitätskonzentration im Boden beobachtet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

- Eine Modellierung der jährlichen Effektiven Ingestionsdosis durch ¹³⁷Cs mit einer Monte-Carlo-Simulation ergab für Erwachsene (über 17-jährige) einen Erwartungswert von 0,93 mSv. Als bester Fit der simulierten Verteilung erwies sich eine Lognormalverteilung mit einer geometrischen Standardabweichung von 1,8. Bei der Modellierung zeigte sich für alle Altersgruppen, insbesondere aber für Kinder und Jugendliche, ein signifikanter Beitrag der Beeren zur Ingestionsdosis. Neben den Beeren ist hauptsächlich der Verzehr von Pilzen entscheidend, wenngleich sich die Dosis durch die Ingestion von Milch für Kleinkinder in der gleichen Größenordnung bewegt. Für Erwachsene liefern Pilze jedoch den größten Beitrag.
- Das differenzierte Bild der auf im Rahmen dieser Arbeit ermittelten ¹³⁷Cs-Gehalten in Lebensmitteln beruhenden Modellierung steht jedoch im Kontrast zu einer Modellierung, die anhand von in den Jahren 1998/99 durchgeführten Messungen vorgenommen wurde. In diesem Fall sind nicht nur die Erwartungswerte bezogen auf die unterschiedlichen Altersgruppen für die gesamte Effektive Ingestionsdosis pro Jahr deutlich geringer, desweiteren beträgt der Anteil der Pilze je nach Altersgruppe etwa 70–90 %.
- Probleme für die Regulation ergeben sich aus dem niedrigen, genannten Grenzwert einer Effektiven Jahresdosis von 1 mSv und dem Umstand, dass für nicht zu vernachlässigende Teile der Bevölkerung der Modellierung gemäß Abschnitt 6.3.1 zufolge eine Überschreitung dieses Grenzwerts bereits aufgrund der Ingestion von ¹³⁷Cs zu erwarten ist. Signifikante Beiträge zur unfallbedingten Strahlenexposition liefern desweiteren die externe Exposition durch ¹³⁷Cs, die Ingestion von ⁹⁰Sr und womöglich auch von Plutoniumisotopen.
- Eine vergleichende Modellierung der Ingestionsdosis anhand von Transferfaktoren ergab keine gute Übereinstimmung mit der "direkten" Modellierung, sondern aufgrund der großen Schwankungsbreite der Transferfaktoren für die dosisbestimmten Pilze und Beeren eine Überschätzung. Es ist daher anzunehmen, dass in der vorliegenden Situation eine direkte Überwachung der Aktivitätsgehalte in Lebensmitteln für eine sinnvolle Abschätzung der Ingestionsdosis notwendig ist. Wünschenswert wären an dieser Stelle detailliertere Kenntnisse zu den Mechanismen der Radionuklidaufnahme insbesondere durch Waldbeeren und -pilze. Womöglich ließe sich dann die beobachtete Inhomogenität der Verteilungen zumindest in Teilen erklären. Voraussetzung dafür wären allerdings auch wesentlich genauere Informationen zu den Probennahmestandorten sowie den Eigenschaften der jeweiligen Böden oder organischen Auflagen.
- Unsicherheiten in der hier durchgeführten Modellierung bestehen insbesondere bei den Verzehrsgewohnheiten. So war es aufgrund der stark unterschiedlichen ¹³⁷Cs-Gehalte in den verschiedenen Beeren- und Pilzsorten notwendig, auch bei den Verzehrsmengen von Beeren und Pilzen nach diesen Sorten zu unterscheiden. Dies konnte jedoch nur aufgrund sehr vager Angaben vollzogen werden. Ein bedeutsames Potenzial für eine höhere Sicherheit insbesondere bei direkten Dosisabschätzungen, d. h. solchen, die ohne Transferfaktoren arbeiten, kann daher in detaillierten und sorgfältigen Untersuchungen zu den Verzehrsgewohnheiten gesehen werden.

A Eingesetzte Geräte und Software

Gerät oder Einsatzzweck	Gerätebezeichnung
Kontaminationsmonitor	Berthold LB 1210 B
Probenzerkleinerung	$2\times$ Moulinex Moulinette Type 899
Analysewaagen	Sartorius E 12000 S (Probenaufbereitung)
	Sartorius U 4100 (Probenaufbereitung)
	Sartorius R 200 D (Einwiegen von QCY48-Lösung)
Trockenschränke	Heraeus UT 6760 (Probenaufbereitung)
	Jürgens Tv40u (Probenaufbereitung)
	Jürgens Tv15uL (Trocknen von QCY48 auf Filterpapier)
Gefriertrocknung	Christ Beta 1-16
Kammeröfen (Veraschung)	$2 \times$ Heraeus K 1253
Probenpresse	Mechanische Presse (Eigenanfertigung des ZSR)
Folienschweissgeräte	$2 \times$ Polystar 100 GE
Detektoren	siehe Tabelle A.3

Tabelle A.1: Übersicht der eingesetzten Geräte.

	1 ¹ 11 • 1 /	1	• , ,	C C
Tabelle A.2:	Ubersicht	der	eingesetzten	Software.

Software	Anwendung
Spekana (Autor: R. Sachse, ZSR)	Auswertung von Gammaspektren
Microsoft Access 2002	Proben- und Literaturdatenbankverwaltung
Microsoft Excel 2002	Tabellenkalkulation
Decisioneering Crystal Ball 2000	Excel-Plugin für Monte-Carlo-Simulationen
Microsoft Word 2002	Textverarbeitung
WinEdt 5.3 mit MikTex 2.4 (Textverarbeitung
OriginLab Origin 6.1G und 7.5G	Wiss. Grafikverarbeitung und stat. Analysen
SPSS 11.5 und 12.0	Statistische Analysen (QQ-Plots)
Maplesoft Maple 9.0	Computeralgebra
Corel CorelDRAW 10	Bildbearbeitung
Adobe Acrobat 5.0	Textansicht und -verarbeitung
Adobe Photoshop 7.0	Bildbearbeitung

FWHM (1333 keV) FWHM (122 keV)	$\mathrm{P/C}~(1333\mathrm{keV})$	Relative Efficiency	Dicke der Totschicht	Abstand Kappe-Kristall	Dicke der Endkappe	Material der Endkappe	Aktives Volumen	Kristalllänge	Kristalldurchmesser	Betriebsspannung	Modellbezeichnung	Hersteller	Detektortyp	Detektor	
2,08 m keV $0,92 m keV$	64,8	56,1%	$0,9~\mathrm{mm}$	$5\mathrm{mm}$	k. A.	Aluminium	$236{ m cm}^3$	$74,0\mathrm{mm}$	$65,0~\mathrm{mm}$	$+ 4 \mathrm{kV}$	IGC 54	Princeton Gamma Tech	Koaxialer p-type	1	
1,84 keV k. A.	58,2	33,1%	$0,3\mu{ m m}$	$4\mathrm{mm}$	$0,5\mathrm{mm}$	Beryllium	k. A.	$53,5\mathrm{mm}$	$59,9\mathrm{mm}$	- 2,5 kV	GMX-30200-P	Ortec	Koaxialer n-type	2	
$1,87{ m keV}$ $0,85{ m keV}$	76,1	58,8~%	$0,7\mathrm{mm}$	$4\mathrm{mm}$	$1,0\mathrm{mm}$	Aluminium	k. A.	$82,0~\mathrm{mm}$	$64,5~\mathrm{mm}$	$+ 2 \mathrm{kV}$	GEM-50195-P	Ortec	Koaxialer p-type	చ	
$1,78{ m keV}$ $0,85{ m keV}$	64,3	35,0%	k. A.	$5\mathrm{mm}$	k. A.	Kunststoff	k. A.	$53,5\mathrm{mm}$	$60,0~\mathrm{mm}$	$+ 4 \mathrm{kV}$	GX3018	Canberra	Koaxialer p-type	4	
$1,87\mathrm{keV}$ $0,89\mathrm{keV}$	64,9	40,3~%	$0,7\mathrm{mm}$	$3\mathrm{mm}$	$1,0\mathrm{mm}$	Aluminium	k. A.	$75,0\mathrm{mm}$	$62,0\mathrm{mm}$	$+ 4 \mathrm{kV}$	GEM-40200-P	Ortec	Koaxialer p-type	cπ	

	La	
	ğ	
	Ē	
	e.	
	\geq	
	نب	
	\pm	
	<u>e</u>	
	ş	
	è	
	<u>e</u>	
	වු	
0	D D	
	ğ	
	ĕ	
	P	
	de	
	÷,	
	te	
	ch	
	₽.	
	SC	
	he	
	Ĕ	
	Ņ	
	pe	
	Ï.	
	Ę	
	ğ	
	5.	
	Ĕ	
	0	
	Þ	
	n d	
	n der	
	n der ir	
	n der in o	
	n der in die	
	n der in diese	
	n der in dieser	
	n der in dieser A	
	n der in dieser Arb	
	n der in dieser Arbei	
	n der in dieser Arbeit (
	n der in dieser Arbeit eir	
	n der in dieser Arbeit eing	
0	n der in dieser Arbeit einges	
C	n der in dieser Arbeit eingeset:	
C	n der in dieser Arbeit eingesetzt	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten F	
C	n der in dieser Arbeit eingesetzten HP	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPG	
C	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPGe-	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPGe-De	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPGe-Dete	
	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPGe-Detek	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPGe-Detekto	
c	n der in dieser Arbeit eingesetzten HPGe-Detektore	

 $\label{eq:Relative Efficiency: Nachweiswahrscheinlichkeit relativ zu einem 3'' \times 3'' - NaI(Tl) - Detektor bei 1333 \, keV \ ({}^{60}Co).$

P/C: "Peak to Compton ratio", Verhältnis der Peakhöhe zu der Höhe des Compton-Plateaus bei 1333 keV (^{60}Co).

k. A.: keine Herstellerangabe. $FWHM: ,Full Width at Half Maximum", Halbwertbreite der Photopeaks bei 1333 \, keV \, ({\rm ^{60}Co}) \, und \, 122 \, keV \, ({\rm ^{57}Co}).$

Anmerkung: Zu den stark unterschiedlichen Dicken der Totschichten siehe Abschnitt 2.5.2.

B.1 Tabellen

Tabelle B.1: Übersicht über den Probenkatalog. Für Erläuterungen siehe Ende der Tabelle (Seite 160).

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
1	Milch	01.03.2002	17	x	x	
2	Milch	01.03.2002	22	x	x	x
3	Milch	01.03.2002	21	x	x	
4	Milch	01.03.2002	23	x	x	
5	Milch	01.03.2002	14	x	x	
6	Milch	01.03.2002	20	x		
7	Milch	01.03.2002	16	x		
8	Milch	01.03.2002	13	x	x	
9	Milch	01.03.2002	15	x	x	
10	Milch	01.03.2002	24	x	x	
11	Milch	01.03.2002	18	x	x	
12	Ziegenmilch	01.03.2002	19	x		
13	Heu	01.03.2002	8	x	x	
14	Heu	01.03.2002	5	x	x	x
15	Heu	01.03.2002	9	x	x	
16	Heu	01.03.2002	7	x	x	
17	Heu	01.03.2002	1	x	x	
18	Heu	01.03.2002	11	x	x	
19	Heu	01.03.2002	12	x	x	x
20	Heu	01.03.2002	6	x	x	
21	Heu	01.03.2002	3	x	x	
22	Heu	01.03.2002	2	x	x	
23	Heu	01.03.2002	4	x	x	
24	Heu	01.03.2002	10	x	х	
25	Schwein (Muskeln)	01.03.2002		x		
26	Schwein (Leber)	01.03.2002		x		
27	Schwein (Niere)	01.03.2002		x		
28	Schwein (Schilddrüse)	01.03.2002		x		
29	Schwein (Knochen)	01.03.2002				
30	Schwein (Leber)	01.04.2002		x		
31	Schwein (Niere)	01.04.2002		x		
32	Schwein (Schilddrüse)	01.04.2002		x		
33	Schwein (Knochen)	01.04.2002				
34	Schwein (Muskeln)	01.04.2002		x	x	

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
35	Schwein (Muskeln)	01.04.2002		x		
36	Schwein (Leber)	01.04.2002		x	x	
37	Schwein (Niere)	01.04.2002		x	x	
38	Schwein (Schilddrüse)	01.04.2002		x		
39	Schwein (Knochen)	01.04.2002			x	
40	Milch	01.05.2002		x	x	
41	Ziegenmilch	01.05.2002		x	x	
42	Milch	01.05.2002		x	x	
43	Milch	01.05.2002		x	x	
44	Milch	01.05.2002		x	x	
45	Milch	01.05.2002		x	x	
46	Milch	01.05.2002		x	x	
48	Milch	01.05.2002		x	x	
49	Milch	01.05.2002		x	x	
50	Milch	01.05.2002		x	x	
51	Milch	01.05.2002		x	x	
52	Milch	01.05.2002		x	x	
53	Milch	01.05.2002		x		
54	Gras	01.05.2002	68	x		
55	Gras	01.05.2002	69	x		
56	Gras	01.05.2002	70	x		
57	Gras	01.05.2002	71	x		
58	Gras	01.05.2002	72	x		
59	Gras	01.05.2002	73	x		
60	Gras	01.05.2002	74	x		
61	Gras	01.05.2002	75	x		
62	Gras	01.05.2002	76	x	x	
63	Gras	01.05.2002	77	x		
64	Gras	01.05.2002	78	x		
65	Gras	01.05.2002	79	x		
66	Gras	01.05.2002	80	x		
68	Boden u. Gras	01.05.2002	54	x	x	
69	Boden u. Gras	01.05.2002	55	v	v	XX
70	Boden u. Gras	01.05.2002	56	v	v	
71	Boden u. Gras	01.05.2002	57	v	v	
72	Boden u. Gras	01.05.2002	58	v	v	
73	Boden u. Gras	01.05.2002	59	v	v	
74	Boden u. Gras	01.05.2002	60	v	v	
75	Boden u. Gras	01.05.2002	61	v	v	
76	Boden 11 Gras	01.05.2002	69	v v	v v	v
77	Boden y Gras	01.05.2002	63	A V	~ ~	A
78	Boden y Gras	01.05.2002	64	A V		v
10 70	Bodon u. Cross	01.05.2002	65	X	v	A
19	Bodon y. Cros	01.05.2002	66	X	X	X
0U 01	Douen u. Gras	01.05.2002	117	X	X	
01	Soucean u. Gras	01.05.2002	117	x		
62 02	Sauerampier	01.05.2002	92	X	X	
63	Sauerampier	01.00.2002	90	X	X	

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
84	Sauerampfer	01.05.2002	98	x	x	
85	Sauerampfer	01.05.2002	93	x	x	
86	Sauerampfer	01.05.2002	96	x		
87	Sauerampfer	01.05.2002	99	x	x	
88	Sauerampfer	01.05.2002	97	x	x	
89	Sauerampfer	01.05.2002	100	x	x	
90	Sauerampfer	01.05.2002	94	x	x	
91	Petersilie	01.05.2002	101	x	x	
92	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	82	x	x	
93	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	85	x	x	
94	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	90	x	x	
95	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	83	x	x	
96	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	86	x	x	
97	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	88	x	x	x
98	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	84	x	x	
99	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	87	x	x	x
100	Boden u. Sauerampfer	01.05.2002	89	x	x	
101	Boden u. Petersilie	01.05.2002	91	x	x	
102	Boden u. Gras	01.05.2002	118	x	x	
103	Boden u. Gras	01.05.2002	114	x	x	
104	Boden u. Gras	01.05.2002	115	x	x	
105	Boden u. Gras	01.05.2002	116	x	x	
106	Hecht	unbekannt	_	x	x	
107	Hecht	unbekannt		x	x	
108	Hecht	unbekannt		x	x	
109	Schleie	unbekannt		x	x	
110	Karpfen	unbekannt		x	x	
111	Karausche	unbekannt		x	x	
112	Rotfeder	unbekannt		x	x	
113	Barsch	unbekannt		x	x	
114	Gras	01.05.2002	103	x	x	
115	Gras	01.05.2002	104	x	x	
116	Gras	01.05.2002	105	x	x	
117	Gras	01.05.2002	81	x	x	
118	Gras	01.05.2002	102	x	x	
119	Flussalgen	01.05.2002		x	x	
120	Flussalgen	01.05.2002		x		
121	Flussalgen	01.05.2002		x	x	
122	Flussalgen	01.05.2002		x	x	
123	Flusssand	01.05.2002		x	x	
124	Flusssand	01.05.2002		x	x	
125	Flusssand	01.05.2002		x	x	
126	Flussschlamm	01.05.2002		x	x	
127	Flussschlamm	01.05.2002		x	x	x
128	Flussschlamm	01.05.2002		x	x	_
129	Hecht	unbekannt		x	x	
130	Schleie	unbekannt		x	x	
		1	I	-	-	I

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
131	Milch	01.06.2002		х	х	
132	Milch	01.06.2002		x		
133	Milch	01.06.2002		x	x	
134	Milch	01.06.2002		x	x	
135	Milch	01.06.2002		x	x	
136	Milch	01.06.2002		x	x	
137	Milch	01.06.2002		x	x	
138	Milch	01.06.2002		x	x	
139	Milch	01.06.2002		х	x	
140	Milch	01.06.2002		x	x	
141	Gras	01.06.2002	151	x	x	
142	Gras	01.06.2002	152	x	x	
143	Gras	01.06.2002	153	x	x	
144	Gras	01.06.2002	154	x		
145	Gras	01.06.2002	155	x	x	
146	Gras	01.06.2002	156	x	x	
147	Gras	01.06.2002	157	x	x	
148	Gras	01.06.2002	158	x	x	
149	Gras	01.06.2002	159	x	x	x
150	Gras	01.06.2002	160	x	x	
151	Boden u. Gras	01.06.2002	141	x	x	
152	Boden u. Gras	01.06.2002	142	x	x	
153	Boden u. Gras	01.06.2002	143	x	x	
154	Boden u. Gras	01.06.2002	144	x	x	
155	Boden u. Gras	01.06.2002	145	x	x	
156	Boden u. Gras	01.06.2002	146	x	x	
157	Boden u. Gras	01.06.2002	147	x	x	
158	Boden u. Gras	01.06.2002	148	x	x	
159	Boden u. Gras	01.06.2002	149	x	x	
160	Boden u. Gras	01.06.2002	150	x	x	
161	Milch	01.07.2002		x	x	
162	Milch	01.07.2002		x	x	
163	Milch	01.07.2002		х	x	x
164	Milch	01.07.2002		x	x	x
165	Milch	01.07.2002		x	x	
166	Milch	01.07.2002		x	x	
167	Milch	01.07.2002		x	x	
168	Milch	01.07.2002		x	x	
169	Milch	01.07.2002		x	x	x
170	Milch	01.07.2002		x	x	
171	Milch	01.07.2002		x	x	
172	Gras	01.07.2002	183	x	x	x
173	Gras	01.07.2002	184	x	x	
174	Gras	01.07.2002	185	x	x	
175	Gras	01.07.2002	186	x	x	
176	Gras	01.07.2002	187	x	x	
177	Gras	01.07.2002	188	x	x	

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
178	Gras	01.07.2002	189	x		
179	Gras	01.07.2002	190	x		
180	Gras	01.07.2002	191	x	x	
181	Gras	01.07.2002	192	x	x	
182	Gras	01.07.2002	193	x	x	
183	Boden u. Gras	01.07.2002	172	x	x	
184	Boden u. Gras	01.07.2002	173	x	x	
185	Boden u. Gras	01.07.2002	174	x	x	
186	Boden u. Gras	01.07.2002	175	x	x	
187	Boden u. Gras	01.07.2002	176	x	x	
188	Boden u. Gras	01.07.2002	177	x	x	х
189	Boden u. Gras	01.07.2002	178	x	x	
190	Boden u. Gras	01.07.2002	179	x		
191	Boden u. Gras	01.07.2002	180	x	x	х
192	Boden u. Gras	01.07.2002	181	x	x	
193	Boden u. Gras	01.07.2002	182	x	x	х
194	Waldhimbeeren	01.07.2002	200, 205	x	x	
195	Waldhimbeeren	01.07.2002	199, 204	x	x	
196	Waldhimbeeren	01.07.2002	201, 208	x	x	
197	Waldhimbeeren	01.07.2002	203, 207	x	x	
198	Waldhimbeeren	01.07.2002	202, 206	x	x	
199	OA u. Waldhimbeeren	01.07.2002	195, 204	x		
200	OA u. Waldhimbeeren	01.07.2002	194.205	x	x	
201	OA u. Waldhimbeeren	01.07.2002	196, 208	x	x	
202	OA u. Waldhimbeeren	01.07.2002	198, 206	x	x	
203	OA u. Waldhimbeeren	01.07.2002	197, 207	x		
204	Boden u. Waldhimbeeren	01.07.2002	195, 199	x	x	
205	Boden u. Waldhimbeeren	01.07.2002	194 200	x	x	
206	Boden u. Waldhimbeeren	01.07.2002	198 202	x	x	
200 207	Boden u. Waldhimbeeren	01.07.2002	197 203	x	x	
208	Boden u. Waldhimbeeren	01.07.2002	196 201	x	x	
209	Haushimbeeren	01.07.2002	212	x	x	
<u>-</u> 00 210	Haushimbeeren	01.07.2002	211	x	x	
210 211	Boden u Haushimbeeren	01.07.2002	210	x	A	
212	Boden u Haushimbeeren	01.07.2002	209	x	x	
213	Heidelbeeren	01.07.2002	221, 225	x		
213	Heidelbeeren	01.07.2002	219 228	x	x	
215	Heidelbeeren	01.07.2002	220, 229	x	x	
216	Heidelbeeren	01.07 2002	222, 226	x	x	
210 217	Heidelbeeren	01.07.2002	223, 220	v	v	
218	Heidelbeeren	01.07 2002	224, 227	x	x	
219	OA 11. Heidelbeeren	01.07 2002	214 228	x	x	
220	OA 11 Heidelbeeren	01.07.2002	215 229	v	v v	
220	OA 11 Heidelbeeren	01.07.2002	213, 225	v		
221	OA 11 Heidelbeeren	01.07.2002	216, 220	v	v	
222 992	OA 11 Heidelbeeren	01.07.2002	210, 220	v v		
220 994	$\Omega \Lambda$ II. Heidelbeeren	01.07.2002	211, 200	· ·		
444 A	OA u. Heidelbeereil	01.01.2002	210, 221	A	A	

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
225	Boden u. Heidelbeeren	01.07.2002	213, 221	х	х	
226	Boden u. Heidelbeeren	01.07.2002	216, 222	x	x	
227	Boden u. Heidelbeeren	01.07.2002	218, 224	x	x	
228	Boden u. Heidelbeeren	01.07.2002	214, 219	x	x	
229	Boden u. Heidelbeeren	01.07.2002	215, 220	x	x	
230	Boden u. Heidelbeeren	01.07.2002	217, 223	x	x	
231	Steinpilze	01.07.2002	239, 251	x	x	
232	Steinpilze	01.07.2002	242, 245	x	x	
233	Steinpilze	01.07.2002	240, 250	x	x	
234	Steinpilze	01.07.2002	238, 249	x	x	
235	Steinpilze	01.07.2002	241, 247	x	x	
236	Steinpilze	01.07.2002	244, 246	x		
237	Steinpilze	01.07.2002	243, 248	x	x	
238	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	234, 249	x	x	
239	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	231, 251	x	x	
240	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	233, 250	x	x	
241	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	235, 247	x		
242	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	232, 245	x	x	
243	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	237, 248	x	x	
244	OA u. Steinpilzen	01.07.2002	236, 246	x	x	
245	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	232, 242	x	x	
246	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	236, 244	x		
247	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	235, 241	x		
248	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	237, 243	x	x	
249	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	234, 238	x		
250	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	233, 240	x	x	
251	Boden u. Steinpilzen	01.07.2002	231, 239	x	х	
252	Pfifferlinge	01.07.2002	257, 263	х	х	
253	Pfifferlinge	01.07.2002	258, 262	х	x	
254	Pfifferlinge	01.07.2002	261, 264	х	х	
255	Pfifferlinge	01.07.2002	260, 265	х	x	
256	Pfifferlinge	01.07.2002	259, 266	х	x	
257	OA u. Pfifferlingen	01.07.2002	252, 263	х	х	
258	OA u. Pfifferlingen	01.07.2002	253, 262	х	х	
259	OA u. Pfifferlingen	01.07.2002	256, 266	x	x	
260	OA u. Pfifferlingen	01.07.2002	255, 265	x	x	
261	OA u. Pfifferlingen	01.07.2002	254, 264	x	x	
262	Boden u. Pfifferlingen	01.07.2002	253, 258	x	x	
263	Boden u. Pfifferlingen	01.07.2002	252, 257	x	x	x
264	Boden u. Pfifferlingen	01.07.2002	254, 261	x	x	
265	Boden u. Pfifferlingen	01.07.2002	255, 260	х	x	
266	Boden u. Pfifferlingen	01.07.2002	256, 259	x	x	
267	Butterpilze	01.07.2002	268, 269	x	x	
268	OA u. Butterpilzen	01.07.2002	267, 269	x	x	
269	Boden u. Butterpilzen	01.07.2002	267, 268	x	x	
270	Tomaten	01.07.2002	281	x	x	
271	Tomaten	01.07.2002	278	x	x	

_	Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
	272	Tomaten	01.07.2002	279	х		
	273	Tomaten	01.07.2002	277	x	x	
	274	Tomaten	01.07.2002	280	x	x	
	275	Tomaten	01.07.2002	276	x	x	
	276	Boden u. Tomaten	01.07.2002	275	x	x	
	277	Boden u. Tomaten	01.07.2002	273	x	x	xx
	278	Boden u. Tomaten	01.07.2002	271	x	x	
	279	Boden u. Tomaten	01.07.2002	272	x	x	
	280	Boden u. Tomaten	01.07.2002	274	x		
	281	Boden u. Tomaten	01.07.2002	270	x		
	282	Gurken	01.07.2002	291	x	x	
	283	Gurken	01.07.2002	288	x	x	
	284	Gurken	01.07.2002	289	x		
	285	Gurken	01.07.2002	287	x	x	
	286	Gurken	01.07.2002	290	x	x	
	287	Boden u. Gurken	01.07.2002	285	x		
	288	Boden u. Gurken	01.07.2002	283	x	x	
	289	Boden u. Gurken	01.07.2002	284	x		
	290	Boden u. Gurken	01.07.2002	286	x	x	
	291	Boden u. Gurken	01.07.2002	282	x	x	
	292	Tabak	01.07.2002	299	x	x	
	293	Tabak	01.07.2002	300	x	x	
	294	Tabak	01.07.2002	301	x	x	
	295	Tabak	01.07.2002	297	x	x	
	296	Tabak	01.07.2002	298	x	x	x
	297	Boden u. Tabak	01.07.2002	295	x	x	
	298	Boden u. Tabak	01.07.2002	296	x	x	
	299	Boden u. Tabak	01.07.2002	292	x	x	
	300	Boden u. Tabak	01.07.2002	293	x	x	
	301	Boden u. Tabak	01.07.2002	294	x	x	
	302	Weizen	01.07.2002	307	x	x	
	303	Weizen	01.07.2002	310	x	x	
	304	Weizen	01.07.2002	308	x	x	
	305	Weizen	01.07.2002	309	x	x	xx
	306	Weizen	01.07.2002	311	x	x	
	307	Boden u. Weizen	01.07.2002	302	x	x	
	308	Boden u. Weizen	01.07.2002	304	x	x	xx
	309	Boden u. Weizen	01.07.2002	305	x	x	
	310	Boden u. Weizen	01.07.2002	303	x	x	
	311	Boden u. Weizen	01.07.2002	306	x	x	
	312	Roggen	01.07.2002	317	x	x	
	313	Roggen	01.07.2002	319	x	x	
	314	Roggen	01.07.2002	318	x	x	
	315	Roggen	01.07.2002	321	x	x	x
	316	Roggen	01.07.2002	320	x	x	
	317	Boden u. Roggen	01.07.2002	312	x	x	xx
	318	Boden u. Roggen	01.07.2002	314	x	x	x
			1	1			1

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
319	Boden u. Roggen	01.07.2002	313	х	x	x
320	Boden u. Roggen	01.07.2002	316	x	x	х
321	Boden u. Roggen	01.07.2002	315	x	x	xx
401	Milch	01.09.2002		х		x
402	Milch	01.09.2002		x		х
403	Milch	01.09.2002		х		x
404	Milch	01.09.2002		x		x
405	Milch	01.09.2002		x		x
406	Milch	01.09.2002		х		х
407	Milch	01.09.2002		х		х
408	Milch	01.09.2002		х		х
409	Milch	01.09.2002		х		х
410	Milch	01.09.2002		x		х
411	Milch	01.09.2002		x		х
412	Milch	01.09.2002		x		х
413	Ziegenmilch	01.09.2002		x		х
414	Gras	01.09.2002	425	х		х
415	Gras	01.09.2002	426	х		х
416	Gras	01.09.2002	427	х		х
417	Gras	01.09.2002	428	х		х
418	Gras	01.09.2002	429	x		x
419	Gras	01.09.2002	430	x		x
420	Gras	01.09.2002	431	х		х
421	Gras	01.09.2002	432	х		х
422	Gras	01.09.2002	433	х		xx
423	Gras	01.09.2002	434	x		xx
424	Gras	01.09.2002	435	x		х
425	Boden u. Gras	15.06.2003	414	x		xx
426	Boden u. Gras	15.06.2003	415	x		х
427	Boden u. Gras	15.06.2003	416	х		xx
428	Boden u. Gras	15.06.2003	417	x		х
429	Boden u. Gras	15.06.2003	418	x		х
430	Boden u. Gras	15.06.2003	419	х		х
431	Boden u. Gras	15.06.2003	420	x		х
432	Boden u. Gras	15.06.2003	421	х		х
433	Boden u. Gras	15.06.2003	422	x		х
434	Boden u. Gras	15.06.2003	423	x		х
435	Boden u. Gras	15.06.2003	424	x		xx
436	Möhren	15.06.2003	442	x		
437	Möhren	15.06.2003	443	х		
438	Möhren	15.06.2003	444	x		x
439	Möhren	15.06.2003	445	x		x
440	Möhren	15.06.2003	446	x		x
441	Möhren	15.06.2003	447	x		x
442	Boden u. Möhren	15.06.2003	436	x		x
443	Boden u. Möhren	15.06.2003	437	x		x
444	Boden u. Möhren	15.06.2003	438	x		x

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
445	Boden u. Möhren	15.06.2003	439	х		x
446	Boden u. Möhren	15.06.2003	440	x		xx
447	Boden u. Möhren	15.06.2003	441	x		xx
448	Kohl	15.06.2003	456	x		х
449	Kohl	15.06.2003	457	x		
450	Kohl	15.06.2003	458	x		
451	Kohl	15.06.2003	463	x		x
452	Kohl	15.06.2003	459	x		x
453	Kohl	15.06.2003	460	x		x
454	Kohl	15.06.2003	461	x		x
455	Kohl	15.06.2003	462	x		x
456	Boden u. Kohl	15.06.2003	448	x		x
457	Boden u. Kohl	15.06.2003	449	x		xx
458	Boden u. Kohl	15.06.2003	450	x		
459	Boden u. Kohl	15.06.2003	452	x		х
460	Boden u. Kohl	15.06.2003	453	x		х
461	Boden u. Kohl	15.06.2003	454	x		XX
462	Boden u. Kohl	15.06.2003	455	x		х
463	Boden u. Kohl	15.06.2003	451	x		XX
464	Kartoffeln	15.06.2003	472	x		
465	Kartoffeln	15.06.2003	473	x		x
466	Kartoffeln	15.06.2003	474	x		х
467	Kartoffeln	15.06.2003	475	x		x
468	Kartoffeln	15.06.2003	476	x		
469	Kartoffeln	15.06.2003	478	x		xx
470	Kartoffeln	15.06.2003	479	x		x
471	Kartoffeln	15.06.2003	480	x		xx
472	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	464	x		х
473	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	465	x		xx
474	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	466	x		х
475	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	467	x		х
476	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	468	x		
477	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	469	x		x
478	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	470	x		х
479	Boden u. Kartoffeln	15.06.2003	471	x		х
480	Rote Bete	15.06.2003	487	x		XX
481	Rote Bete	15.06.2003	488	x		х
482	Rote Bete	15.06.2003	489	x		x
483	Rote Bete	15.06.2003	490	x		х
484	Rote Bete	15.06.2003	491	x		
485	Rote Bete	15.06.2003	492	x		
486	Rote Bete	15.06.2003	493	x		x
487	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	480	x		x
488	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	481	x		x
489	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	482	x		xx
490	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	483	x		xx
491	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	484	x		x

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
492	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	485	x		x
493	Boden u. Rote Bete	15.06.2003	486	x		x
494	Butterpilze	15.06.2003	498, 502	x		x
495	Butterpilze	15.06.2003	499, 503	x		x
496	Butterpilze	15.06.2003	500, 504	x		x
497	Butterpilze	15.06.2003	501, 505	x		x
498	OA u. Butterpilzen	15.06.2003	494, 502	x		x
499	OA u. Butterpilzen	15.06.2003	495, 503	x		x
500	OA u. Butterpilzen	15.06.2003	496, 504	x		x
501	OA u. Butterpilzen	15.06.2003	497, 505	x		x
502	Boden u. Butterpilzen	15.06.2003	494, 498	x		x
503	Boden u. Butterpilzen	15.06.2003	495, 499	x		x
504	Boden u. Butterpilzen	15.06.2003	496, 500	x		x
505	Boden u. Butterpilzen	15.06.2003	497, 501	x		x
506	Wildschwein (Leber)	15.06.2003		x		
507	Wildschwein (Lunge)	15.06.2003		x		x
508	Wildschwein (Herz)	15.06.2003		x		x
509	Wildschwein (Niere)	15.06.2003		x		x
510	Schwein (Muskeln)	15.06.2003		x		x
511	Schwein (Niere)	15.06.2003		x		x
512	Schwein (Leber)	15.06.2003		x		
513	Schwein (Schilddrüse)	15.06.2003		x		
514	Schwein (Knochen)	15.06.2003		x		x
515	Schwein (Kiefer/Zähne)	15.06.2003		x		
516	Schwein (Muskeln)	15.06.2003		x		x
517	Schwein (Niere)	15.06.2003		x		
518	Schwein (Leber)	15.06.2003		x		x
519	Schwein (Schilddrüse)	15.06.2003		x		
520	Schwein (Knochen)	15.06.2003		x		x
521	Schwein (Kiefer/Zähne)	15.06.2003		x		x
522	Ziegenmilch	01.12.2002		x		x
523	Milch	01.12.2002		х		x
524	Milch	01.12.2002		х		x
525	Ziegenmilch	01.12.2002		x		x
526	Milch	01.12.2002		x		х
527	Milch	01.12.2002		x		x
528	Milch	01.12.2002		x		x
529	Milch	01.12.2002		x		x
530	Milch	01.12.2002		x		x
531	Milch	01.12.2002		x		x
532	Milch	01.12.2002		x		x
533	Heu	15.06.2003		x		x
534	Heu	15.06.2003		x		x
535	Heu	15.06.2003		x		x
536	Heu	15.06.2003		x		x
537	Heu	15.06.2003		x		x
538	Heu	15.06.2003		x		х

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
539	Heu	15.06.2003		х		x
540	Heu	15.06.2003		x		x
541	Heu	15.06.2003		x		x
542	Heu	15.06.2003		x		x
543	Heu	15.06.2003		x		x
544	Schwein (Muskeln)	15.06.2003		x		x
545	Schwein (Leber)	15.06.2003		x		x
546	Schwein (Schilddrüse)	15.06.2003		x		
547	Schwein (Niere)	15.06.2003		x		xx
548	Schwein (Knochen)	15.06.2003		x		x
549	Schwein (Kiefer/Zähne)	15.06.2003		x		x
550	Reh (Muskeln)	15.06.2003		x		
551	Reh (Leber)	15.06.2003		x		
552	Reh (Niere)	15.06.2003		x		x
553	Reh (Knochen)	15.06.2003		x		
554	Reh (Kiefer/Zähne)	15.06.2003		x		
601	Milch	15.06.2003		x		x
602	Milch	15.06.2003		x		x
603	Milch	15.06.2003		x		x
604	Milch	15.06.2003		x		x
605	Milch	15.06.2003		x		x
606	Milch	15.06.2003		x		x
607	Milch	15.06.2003		x		x
608	Milch	15.06.2003		x		x
609	Milch	15.06.2003		x		x
610	Ziegenmilch	15.06.2003		x		x
611	Milch	15.06.2003		x		x
612	Gras	15.06.2003	620	x		x
613	Gras	15.06.2003	621	x		x
614	Gras	15.06.2003	622	x		xx
615	Gras	15.06.2003	623	x		x
616	Gras	15.06.2003	624	x		x
617	Gras	15.06.2003	625	x		x
618	Gras	15.06.2003	626	x		x
619	Gras	15.06.2003	627	x		x
620	Boden u. Gras	15.06.2003	612	x		x
621	Boden u. Gras	15.06.2003	613	x		x
622	Boden u. Gras	15.06.2003	614	x		x
623	Boden u. Gras	15.06.2003	615	x		x
624	Boden u. Gras	15.06.2003	616	x		x
625	Boden u. Gras	15.06.2003	617	x		x
626	Boden u. Gras	15.06.2003	618	x		x
627	Boden u. Gras	15.06.2003	619	x		x
628	Hauserdbeeren	15.06.2003	630	x		xx
629	Hauserdbeeren	15.06.2003	631	x		xx
630	Boden u. Hauserdbeeren	15.06.2003	628	x		x
631	Boden u. Hauserdbeeren	15.06.2003	629	x		x
		1	1	1	1	1

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
632	Sauerampfer	15.06.2003	633	х		x
633	Boden u. Sauerampfer	15.06.2003	632	x		xx
634	Kopfsalat	15.07.2003	636	x		x
635	Kopfsalat	15.07.2003	637	x		x
636	Boden u. Kopfsalat	15.07.2003	634	x		xx
637	Boden u. Kopfsalat	15.07.2003	635	x		x
639	Waldhimbeeren	15.07.2003	642, 645	x		x
640	Waldhimbeeren	15.07.2003	643, 646	x		x
641	Waldhimbeeren	15.07.2003	644, 647	х		x
642	OA u. Waldhimbeeren	15.07.2003	639, 645	х		x
643	OA u. Waldhimbeeren	15.07.2003	640, 646	x		x
644	OA u. Waldhimbeeren	15.07.2003	641, 647	x		x
645	Boden u. Waldhimbeeren	15.07.2003	639, 642	x		x
646	Boden u. Waldhimbeeren	15.07.2003	640, 643	x		x
647	Boden u. Waldhimbeeren	15.07.2003	641, 644	x		x
648	Walderdbeeren	15.07.2003	651, 654	x		x
649	Walderdbeeren	15.07.2003	652, 655	x		x
650	Walderdbeeren	15.07.2003	653, 656	x		x
651	OA u Walderdbeeren	15 07 2003	648 654	x		x
652	OA u Walderdbeeren	15 07 2003	649 655	x		x
653	OA u Walderdbeeren	15.07.2003	650 656	v		x
654	Boden 11 Walderdbeeren	15.07.2003	648 651	v		x
655	Boden u. Walderdbeeren	15.07.2003	649 652	v		x v
656	Boden u. Walderdbeeren	15.07.2003	650 653	v		X XX
657	Heidelbeeren	15.07.2003	659 661	N V		v
658	Heidelbeeren	15.07.2003	660 662	N V		x
659	Ω u Heidelbeeren	15.07.2003	657 661	N V		x
660	OA u Heidelbeeren	15.07.2003	658 662	л v		x v
661	Bodon y Hoidolbooron	15.07.2003	657 650	X		X
662	Boden u. Heidelbeeren	15.07.2003	658 660	X		X
662	Heidelbeeren	15.07.2003	666 660	л 		
664	Heidelbeeren	15.07.2003	667 670	л 		x
665	Heidelbeeren	15.07.2003	669 671	X		X
000		15.07.2005	008, 071 662, 660	X		X
000	OA u. Heidelbeeren	15.07.2003	003, 009 664 670	X		X
669	OA u. Heidelbeeren	15.07.2003	004, 070 665 671	X		X
600	DA U. Heidelbeeren	15.07.2003	005, 071	х		x
009	Boden u. Heidelbeeren	15.07.2003	003, 000	х		x
670	Boden u. Heidelbeeren	15.07.2003	664, 667	х		XX
071	Boden u. Heidelbeeren	15.07.2003	665, 668	х		x
672	Preiselbeeren	15.07.2003	673	х		x
673	Boden u. Preiselbeeren	15.07.2003	672	х		x
674	Stempilze	01.08.2003	677, 680	х		x
675	Steinpilze	15.07.2003	678, 681	х		x
676	Steinpilze	15.07.2003	679, 682	х		x
677	OA u. Steinpilzen	15.07.2003	674,680	х		x
678	OA u. Steinpilzen	15.07.2003	675, 681	х		x
679	OA u. Steinpilzen	15.07.2003	676, 682	х		x

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
 680	Boden u. Steinpilzen	15.07.2003	674,677	x		х
681	Boden u. Steinpilzen	15.07.2003	675,678	x		x
682	Boden u. Steinpilzen	15.07.2003	676,679	x		xx
683	Pfifferlinge	15.07.2003	686,689	x		x
684	Pfifferlinge	15.07.2003	687,690	x		x
685	Pfifferlinge	15.07.2003	688, 691	x		x
686	OA u. Pfifferlingen	15.07.2003	683, 689	х		x
687	OA u. Pfifferlingen	15.07.2003	684, 690	x		x
688	OA u. Pfifferlingen	15.07.2003	685, 691	x		x
689	Boden u. Pfifferlingen	15.07.2003	683, 686	x		xx
690	Boden u. Pfifferlingen	15.07.2003	684, 687	x		xx
691	Boden u. Pfifferlingen	15.07.2003	685,688	x		x
692	Butterpilze	15.07.2003	695, 698	x		x
693	Butterpilze	15.07.2003	696, 699	x		x
694	Butterpilze	15.07.2003	697, 700	x		x
695	OA u. Butterpilzen	15.07.2003	692, 698	x		x
696	OA u. Butterpilzen	15.07.2003	693, 699	x		x
697	OA u. Butterpilzen	15.07.2003	694, 700	x		x
698	Boden u. Butterpilzen	15.07.2003	692, 695	x		x
699	Boden u. Butterpilzen	15.07.2003	693, 696	x		x
700	Boden u. Butterpilzen	15.07.2003	694, 697	x		x
701	Birkenpilze	15.07.2003	704, 707	x		x
702	Birkenpilze	15.07.2003	705, 708	x		x
703	Birkenpilze	15.07.2003	706, 709	x		x
704	OA u. Birkenpilzen	15.07.2003	701, 707	x		x
705	OA u. Birkenpilzen	15.07.2003	702, 708	x		x
706	OA u. Birkenpilzen	15.07.2003	703, 709	x		x
707	Boden u. Birkenpilzen	15.07.2003	701, 704	x		x
708	Boden u. Birkenpilzen	15.07.2003	702, 705	x		xx
709	Boden u. Birkenpilzen	15.07.2003	703, 706	x		x
710	Rotkappe	15.07.2003	713, 716	x		x
711	Rotkappe	15.07.2003	714, 717	x		x
712	Rotkappe	15.07.2003	715, 718	x		x
713	OA u. Rotkappe	15.07.2003	710, 716	x		x
714	OA u. Rotkappe	15.07.2003	711, 717	x		x
715	OA u. Rotkappe	15.07.2003	712, 718	x		x
716	Boden u. Rotkappe	15.07.2003	710, 713	x		x
717	Boden u. Rotkappe	15.07.2003	711, 714	x		x
718	Boden u. Rotkappe	15.07.2003	712, 715	x		xx
719	Körniger Frischkäse	15.09.2003		x		x
720	Körniger Frischkäse	15.09.2003		x		x
721	Körniger Frischkäse	15.09.2003		x		xx
722	Körniger Frischkäse	15.09.2003		x		x
723	Erbsen	15.09.2003	725			x
724	Erbsen	15.09.2003	726			xx
725	Boden u. Erbsen	15.09.2003	723	x		x
726	Boden u. Erbsen	15.09.2003	724	x		x

Nr.	Probenmaterial	Probennahme	Verknüpfung	SUAEU	[Kal03]	Diese Arbeit
727	Roggen	15.09.2003	729			х
728	Roggen	15.09.2003	730			х
729	Boden u. Roggen	15.09.2003	727	x		xx
730	Boden u. Roggen	15.09.2003	728	x		х
731	Hafer	15.09.2003	734			xx
732	Hafer	15.09.2003	735			xx
733	Hafer	15.09.2003	736			xx
734	Boden u. Hafer	15.09.2003	731	x		х
735	Boden u. Hafer	15.09.2003	732	x		xx
736	Boden u. Hafer	15.09.2003	733	x		x
737	Mais	15.09.2003	740			х
738	Mais	15.09.2003	741			х
739	Mais	15.09.2003	742			х
740	Boden u. Mais	15.09.2003	737	x		х
741	Boden u. Mais	15.09.2003	738	x		х
742	Boden u. Mais	15.09.2003	739	x		xx
743	Weizen	15.09.2003	746			х
744	Weizen	15.09.2003	747			х
745	Weizen	15.09.2003	748			х
746	Boden u. Weizen	15.09.2003	743	x		xx
747	Boden u. Weizen	15.09.2003	744	х		x
748	Boden u. Weizen	15.09.2003	745	х		xx

Bemerkungen:

- Bei den Probennummern handelt es sich um eine ZSR-interne Nummerierung.
- ,OA' steht für ,Organische Auflage'.
- Die Spalte 'Verknüpfung' nennt zueinandergehörige Proben, z.B. eine Pflanzen- und eine Bodenprobe.
- Bei fehlenden Einträgen in der Spalte ,Verknüpfung' fehlen entweder entsprechende Informationen, oder es handelt sich um eine Einzelprobe.
- Die letzten drei Spalten informieren darüber, ob die Proben im Rahmen der jeweiligen Arbeiten auf ihre spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten hin ausgewertet wurden.
- Seitens der SUAEU wurden nur spezifische Aktivitäten von ¹³⁷Cs bestimmt.
- In [Kal03] ausgewertete Bodenproben wurden bereits im Vorfeld jener Arbeit am ZSR vermessen. Diese Messungen sind ebenfalls in der zweiten Spalte von rechts vermerkt. Bei allen diesen Messungen wurde nur ¹³⁷Cs und ⁴⁰K ausgewertet.
- Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen steht ,x' für eine Messung und Auswertung nur von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K . Mit ,xx' gekennzeichnete Proben wurden noch ein weiteres Mal mit wesentlich erhöhter Messzeit gemessen, um auch Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen auswerten zu können.

Tabelle B.2: Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten spezifischen Aktivitäten von 137 Cs und 40 K in den einzelnen Proben. Für Erläuterungen siehe Ende der Tabelle (Seite 174).

				^{137}Cs	⁴⁰ K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
1	Milch	2	ТМ	679 ± 35	441 ± 43
2	Milch	3	TM	$116,1\pm6,0$	303 ± 20
3	Milch	2	TM	$43{,}4\pm2{,}4$	305 ± 20
4	Milch	2	ТМ	333 ± 18	502 ± 45
5	Milch	2	TM	462 ± 23	358 ± 22
6	Milch				
7	Milch				
8	Milch	2	TM	$90,3\pm4,7$	436 ± 26
9	Milch	2	TM	$61,7\pm4,5$	368 ± 38
10	Milch	2	TM	$72,3\pm3,8$	386 ± 24
11	Milch	2	TM	$50,3\pm3,7$	479 ± 43
12	Ziegenmilch				
13	Heu	2	TM	$30,4\pm3,4$	607 ± 63
14	Heu	3	TM	902 ± 45	420 ± 26
15	Heu	2	TM	1653 ± 85	519 ± 62
16	Heu	2	ТМ	1069 ± 56	391 ± 48
17	Heu	2	TM	1800 ± 90	402 ± 27
18	Heu	2	TM	167 ± 11	561 ± 67
19	Heu	3	TM	710 ± 36	305 ± 23
20	Heu	2	TM	$103,5\pm5,5$	836 ± 48
21	Heu	2	TM	$98,2\pm7,0$	909 ± 74
22	Heu	2	TM	$86,0\pm6,3$	646 ± 66
23	Heu	2	TM	748 ± 39	664 ± 61
24	Heu	2	TM	$152{,}4\pm8{,}0$	544 ± 34
25	Schwein (Muskeln)	2	AsM	2677 ± 135	8716 ± 452
26	Schwein (Leber)				
27	Schwein (Niere)				
28	Schwein (Schilddrüse)				
29	Schwein (Knochen)				
30	Schwein (Leber)				
31	Schwein (Niere)	2	TM	$85{,}2\pm5{,}4$	281 ± 32
32	Schwein (Schilddrüse)				
33	Schwein (Knochen)	2	AsM	$32{,}3\pm2{,}9$	*2
34	Schwein (Muskeln)	2	AsM	1582 ± 80	5505 ± 291
35	Schwein (Muskeln)	2	AsM	729 ± 37	2221 ± 119
36	Schwein (Leber)	2	TM	1496 ± 75	$123{,}6\pm8{,}9$
37	Schwein (Niere)	2	TM	$45{,}9\pm2{,}6$	169 ± 14
38	Schwein (Schilddrüse)				
39	Schwein (Knochen)				
40	Milch	2	TM	912 ± 47	400 ± 39
41	Ziegenmilch	2	TM	199 ± 10	415 ± 24
42	Milch	2	TM	$133,9\pm7,7$	301 ± 32

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
43	Milch	2	TM	$154,1 \pm 8,8$	461 ± 41
44	Milch	2	TM	266 ± 14	352 ± 37
45	Milch	2	TM	$179,5 \pm 9,5$	379 ± 30
46	Milch	2	TM	$168,0\pm8,6$	441 ± 26
48	Milch	2	TM	$141,2 \pm 8,4$	412 ± 39
49	Milch	2	TM	$122,7\pm7,7$	430 ± 42
50	Milch	2	TM	$98,2\pm5,3$	303 ± 23
51	Milch	2	TM	1241 ± 62	340 ± 22
52	Milch	2	TM	$158,1\pm8,1$	367 ± 23
53	Milch	2	TM	$118,1\pm7,1$	341 ± 34
54	Gras	2	TM	139.2 ± 7.2	614 ± 35
55	Gras	2	TM	$73,1\pm3,8$	964 ± 52
56	Gras	2	TM	$91,2\pm4,7$	885 ± 47
57	Gras	2	TM	$90,7\pm4,7$	806 ± 44
58	Gras	2	TM	$156,7\pm8,0$	800 ± 44
59	Gras	2	TM	$79,6\pm 4,2$	748 ± 41
60	Gras	2	TM	$93,0\pm4,8$	1133 ± 61
61	Gras	2	TM	$120,8\pm6,2$	723 ± 40
62	Gras	2	TM	$110,0\pm5,7$	832 ± 46
63	Gras	2	TM	1999 ± 100	487 ± 28
64	Gras	2	TM	2158 ± 108	508 ± 29
65	Gras	2	TM	661 ± 33	541 ± 31
66	Gras	2	TM	446 ± 23	654 ± 36
68	Boden u. Gras	1	TM	1373 ± 141	305 ± 32
69	Boden u. Gras	3	TM	903 ± 45	363 ± 19
70	Boden u. Gras	1	TM	1607 ± 163	345 ± 35
71	Boden u. Gras	1	TM	1460 ± 150	314 ± 33
72	Boden u. Gras	1	TM	1587 ± 162	362 ± 37
73	Boden u. Gras	1	TM	1632 ± 168	342 ± 35
74	Boden u. Gras	1	TM	1806 ± 185	344 ± 36
75	Boden u. Gras	1	TM	1813 ± 185	348 ± 35
76	Boden u. Gras	3	TM	1097 ± 55	372 ± 20
77	Boden u. Gras	1	TM	6603 ± 576	417 ± 38
78	Boden u. Gras	3	TM	11453 ± 574	517 ± 29
79	Boden u. Gras	3	TM	4548 ± 228	377 ± 21
80	Boden u. Gras	1	TM	7698 ± 823	352 ± 36
81	Boden u. Gras	1	TM	$*_1$	267 ± 27
82	Sauerampfer	2	TM	210 ± 11	2528 ± 138
83	Sauerampfer	2	TM	$179,4 \pm 9,1$	1844 ± 97
84	Sauerampfer	2	TM	617 ± 33	1074 ± 77
85	Sauerampfer	2	TM	$153,3\pm8,2$	1643 ± 92
86	Sauerampfer				
87	Sauerampfer	2	TM	556 ± 30	1185 ± 99
88	Sauerampfer	2	TM	1091 ± 55	1417 ± 80
89	Sauerampfer	2	TM	922 ± 49	1374 ± 108
90	Sauerampfer	2	TM	1560 ± 78	1347 ± 76

				$^{137}\mathrm{Cs}$	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
91	Petersilie	2	TM	$137,4 \pm 7,3$	1604 ± 89
92	Boden u. Sauerampfer	1	TM	971 ± 104	402 ± 40
93	Boden u. Sauerampfer	1	TM	1079 ± 116	292 ± 29
94	Boden u. Sauerampfer	1	TM	17170 ± 1846	177 ± 31
95	Boden u. Sauerampfer	1	TM	809 ± 88	287 ± 29
96	Boden u. Sauerampfer	1	TM	666 ± 72	246 ± 24
97	Boden u. Sauerampfer	3	TM	6845 ± 343	$129,0\pm7,3$
98	Boden u. Sauerampfer	1	TM	3361 ± 357	194 ± 23
99	Boden u. Sauerampfer	3	TM	3334 ± 167	$155,1\pm9,1$
100	Boden u. Sauerampfer	1	TM	4342 ± 473	*1
101	Boden u. Petersilie	1	TM	1455 ± 157	324 ± 32
102	Boden u. Gras	1	TM	7190 ± 781	271 ± 29
103	Boden u. Gras	1	TM	1843 ± 194	398 ± 40
104	Boden u. Gras	1	TM	1739 ± 185	354 ± 37
105	Boden u. Gras	1	TM	1443 ± 151	468 ± 46
106	Hecht	2	AsM	11088 ± 574	10812 ± 579
107	Hecht	2	AsM	14606 ± 741	8456 ± 446
108	Hecht	2	AsM	6695 ± 340	6678 ± 353
109	Schleie	2	AsM	6306 ± 322	5540 ± 295
110	Karpfen	2	AsM	5013 ± 254	6839 ± 358
111	Karausche	2	AsM	478 ± 25	2496 ± 140
112	Rotfeder	2	AsM	3261 ± 180	8979 ± 515
113	Barsch	2	AsM	8324 ± 483	8840 ± 538
114	Gras	2	TM	$91,8\pm5,9$	425 ± 44
115	Gras	2	TM	185 ± 10	571 ± 48
116	Gras	2	TM	$143,2\pm8,6$	569 ± 53
117	Gras	2	TM	265 ± 13	893 ± 49
118	Gras	2	TM	199 ± 12	1581 ± 103
119	Flussalgen	2	TM	256 ± 13	1128 ± 60
120	Flussalgen				
121	Flussalgen	2	TM	296 ± 15	737 ± 39
122	Flussalgen	2	TM	269 ± 14	1439 ± 76
123	Flusssand	2	TM	$85,5\pm4,3$	$50,7\pm3,5$
124	Flusssand	2	TM	$182,4\pm9,1$	$102{,}6\pm5{,}7$
125	Flusssand	2	TM	229 ± 12	$64,7 \pm 5,1$
126	Flussschlamm	2	TM	1190 ± 60	171 ± 10
127	Flussschlamm	3	TM	988 ± 50	$159,4\pm9,3$
128	Flussschlamm	2	TM	598 ± 30	$94,0 \pm 5,5$
129	Hecht	2	AsM	6904 ± 346	4531 ± 235
130	Schleie	2	AsM	13372 ± 674	5372 ± 282
131	Milch	2	TM	$130,6\pm7,\!6$	345 ± 35
132	Milch				
133	Milch	2	TM	$151,9\pm7,8$	322 ± 21
134	Milch	2	TM	$103,7\pm6,1$	323 ± 32
135	Milch	2	TM	$154,9 \pm 8,9$	271 ± 34
136	Milch	2	TM	$130,3\pm7,7$	427 ± 39

				¹³⁷ Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$
137	Milch	2	TM	$129,7 \pm 7,6$	370 ± 36
138	Milch	2	TM	1085 ± 55	314 ± 33
139	Milch	2	TM	$137,5\pm8,0$	360 ± 37
140	Milch	2	TM	687 ± 36	442 ± 40
141	Gras	2	TM	792 ± 42	526 ± 58
142	Gras	2	TM	336 ± 19	531 ± 62
143	Gras	2	TM	945 ± 49	442 ± 47
144	Gras				
145	Gras	2	TM	$142,8\pm7,6$	462 ± 31
146	Gras	2	TM	1189 ± 63	501 ± 67
147	Gras	2	TM	1457 ± 75	499 ± 61
148	Gras	2	TM	553 ± 29	699 ± 66
149	Gras	3	TM	901 ± 45	557 ± 35
150	Gras	2	TM	814 ± 43	401 ± 55
151	Boden u. Gras	1	TM	1040 ± 121	296 ± 32
152	Boden u. Gras	1	TM	1854 ± 217	284 ± 30
153	Boden u. Gras	1	TM	1183 ± 129	266 ± 27
154	Boden u. Gras	1	TM	1829 ± 199	392 ± 38
155	Boden u. Gras	1	TM	2756 ± 300	399 ± 39
156	Boden u. Gras	1	TM	9464 ± 934	518 ± 45
157	Boden u. Gras	1	TM	7812 ± 755	534 ± 45
158	Boden u. Gras	1	TM	6221 ± 670	306 ± 30
159	Boden u. Gras	1	TM	5587 ± 603	294 ± 29
160	Boden u. Gras	1	TM	6438 ± 695	314 ± 31
161	Milch	2	TM	1071 ± 54	449 ± 26
162	Milch	2	TM	194 ± 10	468 ± 28
163	Milch	3	TM	267 ± 14	403 ± 24
164	Milch	3	TM	284 ± 15	591 ± 37
165	Milch	2	TM	244 ± 12	328 ± 21
166	Milch	2	TM	230 ± 12	427 ± 26
167	Milch	2	TM	204 ± 10	410 ± 25
168	Milch	2	TM	1789 ± 90	494 ± 29
169	Milch	3	TM	1466 ± 74	395 ± 23
170	Milch	2	TM	$70,8 \pm 3,8$	418 ± 27
171	Milch	2	TM	204 ± 11	373 ± 36
172	Gras	3	TM	$174,1\pm9,0$	316 ± 22
173	Gras	2	TM	$97,0\pm7,0$	836 ± 76
174	Gras	2	TM	308 ± 16	420 ± 29
175	Gras	2	TM	607 ± 30	536 ± 29
176	Gras	2	TM	244 ± 12	435 ± 27
177	Gras	2	TM	289 ± 15	436 ± 28
178	Gras				
179	Gras				
180	Gras	2	TM	606 ± 31	564 ± 33
181	Gras	2	TM	1865 ± 94	743 ± 43
182	Gras	2	TM	2156 ± 109	548 ± 51

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
183	Boden u. Gras	1	TM	1691 ± 184	297 ± 32
184	Boden u. Gras	1	TM	1141 ± 124	338 ± 34
185	Boden u. Gras	1	TM	1282 ± 139	267 ± 26
186	Boden u. Gras	1	TM	1528 ± 166	286 ± 28
187	Boden u. Gras	1	TM	1723 ± 187	245 ± 27
188	Boden u. Gras	3	TM	1788 ± 90	282 ± 17
189	Boden u. Gras	1	TM	9700 ± 955	447 ± 39
190	Boden u. Gras	1	TM	$*_1$	644 ± 100
191	Boden u. Gras	3	TM	6804 ± 341	276 ± 15
192	Boden u. Gras	1	TM	7448 ± 796	312 ± 30
193	Boden u. Gras	3	TM	8804 ± 441	257 ± 15
194	Waldhimbeeren	2	TM	14697 ± 737	*2
195	Waldhimbeeren	2	TM	7983 ± 400	253 ± 25
196	Waldhimbeeren	2	TM	$162,8\pm8,8$	260 ± 25
197	Waldhimbeeren	2	TM	1980 ± 100	305 ± 35
198	Waldhimbeeren	2	TM	6671 ± 335	294 ± 27
199	OA u. Waldhimbeeren				
200	OA u. Waldhimbeeren	2	TM	113864 ± 5705	*2
201	OA u. Waldhimbeeren	2	TM	2133 ± 109	228 ± 46
202	OA u. Waldhimbeeren	2	TM	21990 ± 1103	127 ± 39
203	OA u. Waldhimbeeren				
204	Boden u. Waldhimbeeren	1	TM	5342 ± 584	113 ± 12
205	Boden u. Waldhimbeeren	1	TM	17910 ± 1967	168 ± 18
206	Boden u. Waldhimbeeren	1	TM	5504 ± 600	191 ± 20
207	Boden u. Waldhimbeeren	1	TM	2804 ± 305	143 ± 15
208	Boden u. Waldhimbeeren	1	TM	174 ± 19	145 ± 16
209	Haushimbeeren	2	TM	566 ± 29	446 ± 34
210	Haushimbeeren	2	TM	$186,4\pm9,5$	255 ± 15
211	Boden u. Haushimbeeren	1	TM	$*_1$	260 ± 30
212	Boden u. Haushimbeeren	1	TM	2103 ± 229	331 ± 33
213	Heidelbeeren	2	TM	87555 ± 4383	169 ± 18
214	Heidelbeeren	2	TM	28223 ± 1413	201 ± 19
215	Heidelbeeren	2	TM	70154 ± 3513	198 ± 20
216	Heidelbeeren	2	TM	4721 ± 237	191 ± 20
217	Heidelbeeren	2	TM	196387 ± 9831	176 ± 11
218	Heidelbeeren	2	TM	1760 ± 88	182 ± 11
219	OA u. Heidelbeeren	2	TM	61613 ± 3086	109 ± 32
220	OA u. Heidelbeeren	2	TM	64599 ± 3235	*2
221	OA u. Heidelbeeren				
222	OA u. Heidelbeeren	2	TM	13625 ± 682	119 ± 14
223	OA u. Heidelbeeren	2	TM	316243 ± 15835	155 ± 28
224	OA u. Heidelbeeren	2	TM	9139 ± 459	*2
225	Boden u. Heidelbeeren	1	TM	$*_1$	42 ± 15
226	Boden u. Heidelbeeren	1	TM	1352 ± 149	108 ± 12
227	Boden u. Heidelbeeren	1	TM	1471 ± 161	$51,3\pm6,5$
228	Boden u. Heidelbeeren	1	TM	175 ± 19	82 ± 11

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$
229	Boden u. Heidelbeeren	1	TM	3583 ± 320	$65,2 \pm 7,4$
230	Boden u. Heidelbeeren	1	TM	3287 ± 238	$73,8\pm7,2$
231	Steinpilze	2	TM	19574 ± 982	619 ± 58
232	Steinpilze	2	TM	30019 ± 1506	1010 ± 86
233	Steinpilze	2	TM	69512 ± 3487	999 ± 90
234	Steinpilze	2	TM	14359 ± 719	691 ± 38
235	Steinpilze	2	TM	26605 ± 1335	949 ± 78
236	Steinpilze				
237	Steinpilze	2	TM	23626 ± 1186	755 ± 73
238	OA u. Steinpilzen	2	TM	15672 ± 786	72 ± 21
239	OA u. Steinpilzen	2	TM	267374 ± 13387	*2
240	OA u. Steinpilzen	2	TM	76584 ± 3835	*2
241	OA u. Steinpilzen				
242	OA u. Steinpilzen	2	TM	73758 ± 3694	*2
243	OA u. Steinpilzen	2	TM	40740 ± 2041	*2
244	OA u. Steinpilzen	2	TM	80412 ± 4028	*2
245	Boden u. Steinpilzen	1	TM	2701 ± 295	123 ± 13
246	Boden u. Steinpilzen				
247	Boden u. Steinpilzen				
248	Boden u. Steinpilzen	1	TM	2671 ± 292	$76,2\pm8,4$
249	Boden u. Steinpilzen	1	TM	*1	189 ± 35
250	Boden u. Steinpilzen	1	TM	3746 ± 408	$73{,}7\pm8{,}7$
251	Boden u. Steinpilzen	1	TM	2620 ± 287	$77,1\pm9,2$
252	Pfifferlinge	2	TM	8652 ± 435	1476 ± 106
253	Pfifferlinge	2	TM	25764 ± 1292	1349 ± 98
254	Pfifferlinge	2	TM	2940 ± 149	1379 ± 102
255	Pfifferlinge	2	TM	75119 ± 3764	1402 ± 88
256	Pfifferlinge	2	TM	1540 ± 79	1466 ± 98
257	OA u. Pfifferlingen	2	TM	6177 ± 310	108 ± 21
258	OA u. Pfifferlingen	2	TM	19032 ± 954	*2
259	OA u. Pfifferlingen	2	TM	2238 ± 114	*2
260	OA u. Pfifferlingen	2	TM	30586 ± 1533	*2
261	OA u. Pfifferlingen	2	TM	2706 ± 136	85 ± 13
262	Boden u. Pfifferlingen	1	TM	4511 ± 490	110 ± 12
263	Boden u. Pfifferlingen	3	TM	2541 ± 127	$117,4\pm7,7$
264	Boden u. Pfifferlingen	1	TM	259 ± 29	139 ± 16
265	Boden u. Pfifferlingen				
266	Boden u. Pfifferlingen	1	TM	247 ± 27	118 ± 13
267	Butterpilze	2	TM	97948 ± 4909	901 ± 77
268	OA u. Butterpilzen	2	TM	2964 ± 149	195 ± 15
269	Boden u. Butterpilzen	1	TM	827 ± 90	$80,9 \pm 9,5$
270	Tomaten	2	TM	469 ± 24	1246 ± 70
271	Tomaten	2	TM	176 ± 10	834 ± 57
272	Tomaten				
273	Tomaten	2	TM	$86,5\pm4,4$	1034 ± 55
274	Tomaten	2	TM	$34,0\pm 2,7$	1105 ± 71

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
275	Tomaten	2	TM	$67,4\pm3,7$	1410 ± 78
276	Boden u. Tomaten	1	TM	534 ± 58	229 ± 22
277	Boden u. Tomaten	3	TM	790 ± 40	309 ± 17
278	Boden u. Tomaten	1	TM	3322 ± 366	283 ± 29
279	Boden u. Tomaten	1	TM	*1	374 ± 37
280	Boden u. Tomaten	1	TM	*1	263 ± 27
281	Boden u. Tomaten	1	TM	4402 ± 479	396 ± 39
282	Gurken	2	TM	$122,5\pm8,3$	1274 ± 98
283	Gurken	2	TM	$76,9 \pm 5,8$	1701 ± 117
284	Gurken	2	TM	284 ± 14	1356 ± 71
285	Gurken	2	TM	286 ± 17	1307 ± 103
286	Gurken	2	TM	243 ± 12	1237 ± 65
287	Boden u. Gurken	1	TM	623 ± 67	275 ± 28
288	Boden u. Gurken	1	TM	1042 ± 113	305 ± 29
289	Boden u. Gurken	1	TM	*1	335 ± 57
290	Boden u. Gurken	1	TM	3803 ± 408	273 ± 27
291	Boden u. Gurken	1	TM	1353 ± 148	361 ± 36
292	Tabak	2	TM	3003 ± 150	971 ± 51
293	Tabak	2	TM	569 ± 30	1379 ± 99
294	Tabak	2	TM	875 ± 44	731 ± 42
295	Tabak	2	TM	402 ± 22	1341 ± 99
296	Tabak	3	TM	338 ± 17	1862 ± 100
297	Boden u. Tabak	1	TM	1398 ± 152	268 ± 27
298	Boden u. Tabak	1	TM	730 ± 80	262 ± 29
299	Boden u. Tabak	1	TM	6925 ± 746	304 ± 29
300	Boden u. Tabak	1	TM	1572 ± 172	352 ± 34
301	Boden u. Tabak	1	TM	3254 ± 356	98 ± 13
302	Weizen	2	TM	$11,2\pm0,8$	160 ± 11
303	Weizen	2	TM	$6{,}6\pm1{,}3$	112 ± 21
304	Weizen	2	TM	$6,9 \pm 1,3$	168 ± 25
305	Weizen	3	TM	$7,8\pm0,6$	148 ± 10
306	Weizen	2	TM	$6,5\pm0,6$	146 ± 11
307	Boden u. Weizen	1	TM	4103 ± 448	221 ± 22
308	Boden u. Weizen	3	TM	943 ± 47	320 ± 18
309	Boden u. Weizen	1	TM	708 ± 77	226 ± 23
310	Boden u. Weizen	1	TM	1292 ± 140	344 ± 33
311	Boden u. Weizen	1	TM	1032 ± 113	305 ± 30
312	Roggen	2	TM	$12{,}4\pm1{,}8$	$10{,}7\pm1{,}6$
313	Roggen	2	TM	$67,4 \pm 4,5$	$58{,}2\pm3{,}9$
314	Roggen	2	TM	$42,2 \pm 3,2$	$36{,}4\pm2{,}8$
315	Roggen	3	TM	$7,7\pm0,5$	$6{,}6~\pm~0{,}5$
316	Roggen	2	TM	$13{,}4\pm1{,}6$	$11,5\pm1,4$
317	Boden u. Roggen	3	TM	783 ± 39	338 ± 18
318	Boden u. Roggen	3	TM	2184 ± 109	320 ± 18
319	Boden u. Roggen	3	TM	3643 ± 183	181 ± 14
320	Boden u. Roggen	3	TM	1600 ± 80	305 ± 19

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[{ m Bq~kg^{-1}}]$	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$
321	Boden u. Roggen	3	TM	466 ± 24	254 ± 17
401	Milch	3	TM	454 ± 23	443 ± 29
402	Milch	3	TM	251 ± 13	434 ± 27
403	Milch	3	TM	232 ± 12	351 ± 21
404	Milch	3	TM	192 ± 10	422 ± 28
405	Milch	3	TM	233 ± 12	360 ± 26
406	Milch	3	TM	500 ± 26	389 ± 28
407	Milch	3	TM	$175,9\pm 8,9$	392 ± 22
408	Milch	3	TM	1340 ± 68	478 ± 32
409	Milch	3	TM	192 ± 10	351 ± 22
410	Milch	3	TM	1369 ± 69	445 ± 29
411	Milch	3	TM	1124 ± 56	368 ± 22
412	Milch	3	TM	234 ± 12	308 ± 23
413	Ziegenmilch	3	TM	$59{,}9 \pm 3{,}2$	356 ± 21
414	Gras	3	TM	654 ± 33	329 ± 25
415	Gras	3	TM	214 ± 12	291 ± 29
416	Gras	3	TM	$54{,}4\pm3{,}1$	1257 ± 68
417	Gras	3	TM	$43,1\pm2,4$	707 ± 39
418	Gras	3	TM	1615 ± 81	434 ± 30
419	Gras	3	TM	1621 ± 82	466 ± 34
420	Gras	3	TM	666 ± 34	527 ± 34
421	Gras	3	TM	675 ± 34	932 ± 53
422	Gras	3	TM	223 ± 11	481 ± 29
423	Gras	3	TM	284 ± 15	932 ± 54
424	Gras	3	TM	$166,2\pm8,6$	733 ± 43
425	Boden u. Gras	3	TM	869 ± 44	295 ± 17
426	Boden u. Gras	3	TM	2437 ± 122	338 ± 19
427	Boden u. Gras	3	TM	1135 ± 57	409 ± 24
428	Boden u. Gras	3	TM	1909 ± 96	417 ± 23
429	Boden u. Gras	3	TM	5202 ± 261	465 ± 28
430	Boden u. Gras	3	TM	19518 ± 977	521 ± 30
431	Boden u. Gras	3	TM	7560 ± 379	273 ± 18
432	Boden u. Gras	3	TM	8894 ± 445	305 ± 20
433	Boden u. Gras	3	TM	8450 ± 423	285 ± 16
434	Boden u. Gras	3	TM	8379 ± 420	260 ± 18
435	Boden u. Gras	3	TM	895 ± 45	310 ± 17
436	Möhren				
437	Möhren				
438	Möhren	3	TM	$115{,}2\pm 6{,}2$	921 ± 53
439	Möhren	3	TM	$178,3\pm9,4$	619 ± 39
440	Möhren	3	TM	$29{,}8\pm2{,}0$	982 ± 56
441	Möhren	3	TM	$60,9 \pm 3,2$	1227 ± 65
442	Boden u. Möhren	3	TM	5826 ± 292	329 ± 18
443	Boden u. Möhren	3	TM	4644 ± 233	213 ± 12
444	Boden u. Möhren	3	TM	1581 ± 79	285 ± 16
445	Boden u. Möhren	3	TM	5399 ± 270	351 ± 22

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
446	Boden u. Möhren	3	ТМ	988 ± 50	301 ± 18
447	Boden u. Möhren	3	TM	1098 ± 55	287 ± 17
448	Kohl	3	TM	$82,8\pm4,8$	1161 ± 67
449	Kohl				
450	Kohl				
451	Kohl	3	TM	$122,0\pm6,\!5$	1023 ± 58
452	Kohl	3	TM	$119,9\pm6,4$	1178 ± 66
453	Kohl	3	TM	$37,1\pm2,4$	1202 ± 68
454	Kohl	3	TM	$94{,}7\pm5{,}4$	933 ± 56
455	Kohl	3	TM	$48,3\pm3,2$	933 ± 58
456	Boden u. Kohl	3	TM	4093 ± 205	226 ± 13
457	Boden u. Kohl	3	TM	767 ± 39	261 ± 17
458	Boden u. Kohl				
459	Boden u. Kohl	3	TM	7838 ± 392	312 ± 17
460	Boden u. Kohl	3	TM	4838 ± 242	290 ± 19
461	Boden u. Kohl	3	TM	821 ± 41	223 ± 15
462	Boden u. Kohl	3	TM	1556 ± 78	272 ± 17
463	Boden u. Kohl	3	TM	1018 ± 51	304 ± 17
464	Kartoffeln				
465	Kartoffeln	3	TM	$26,9 \pm 1,5$	784 ± 42
466	Kartoffeln	3	TM	$120,2\pm6,\!3$	960 ± 53
467	Kartoffeln	3	TM	$22,6 \pm 1,\!3$	706 ± 39
468	Kartoffeln				
469	Kartoffeln	3	TM	$33{,}2\pm1{,}8$	880 ± 47
470	Kartoffeln	3	TM	$71,0\pm3,\!9$	1012 ± 58
471	Kartoffeln	3	TM	$24{,}9\pm1{,}4$	798 ± 43
472	Boden u. Kartoffeln	3	TM	5623 ± 282	250 ± 16
473	Boden u. Kartoffeln	3	TM	675 ± 34	234 ± 13
474	Boden u. Kartoffeln	3	TM	4310 ± 216	229 ± 13
475	Boden u. Kartoffeln	3	TM	1074 ± 54	318 ± 21
476	Boden u. Kartoffeln				
477	Boden u. Kartoffeln	3	TM	1007 ± 50	207 ± 12
478	Boden u. Kartoffeln	3	TM	6280 ± 315	368 ± 22
479	Boden u. Kartoffeln	3	TM	1270 ± 64	313 ± 17
480	Rote Bete	3	TM	$85,6\pm4,6$	756 ± 43
481	Rote Bete	3	TM	630 ± 32	1254 ± 66
482	Rote Bete	3	TM	$34,5 \pm 1,9$	1020 ± 54
483	Rote Bete	3	TM	$22,1 \pm 1,7$	799 ± 47
484	Rote Bete				
485	Rote Bete				
486	Rote Bete	3	TM	$46,7 \pm 2,5$	1486 ± 78
487	Boden u. Rote Bete	3	TM	1011 ± 51	257 ± 14
488	Boden u. Rote Bete	3	TM	7486 ± 375	318 ± 17
489	Boden u. Rote Bete	3	TM	626 ± 32	219 ± 15
490	Boden u. Rote Bete	3	TM	791 ± 40	311 ± 19
491	Boden u. Rote Bete	3	TM	1523 ± 76	318 ± 18

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[{ m Bq~kg^{-1}}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
492	Boden u. Rote Bete	3	TM	4982 ± 249	219 ± 12
493	Boden u. Rote Bete	3	TM	5734 ± 287	345 ± 20
494	Butterpilze	3	TM	1534594 ± 76829	824 ± 52
495	Butterpilze	3	TM	511751 ± 25620	747 ± 42
496	Butterpilze	3	TM	2811612 ± 140758	737 ± 66
497	Butterpilze	3	TM	820480 ± 41074	800 ± 46
498	OA u. Butterpilzen	3	TM	65212 ± 3265	$100,6\pm7,\!9$
499	OA u. Butterpilzen	3	TM	12229 ± 612	$98,0\pm7,2$
500	OA u. Butterpilzen	3	TM	301218 ± 15080	$63{,}5\pm7{,}0$
501	OA u. Butterpilzen	3	TM	28562 ± 1430	$95{,}8\pm7{,}3$
502	Boden u. Butterpilzen	3	TM	10613 ± 531	$104{,}7\pm7{,}4$
503	Boden u. Butterpilzen	3	TM	3135 ± 157	$113,9\pm6,8$
504	Boden u. Butterpilzen	3	TM	14825 ± 742	$105,7\pm7,1$
505	Boden u. Butterpilzen	3	TM	8138 ± 407	$87,9\pm6,0$
506	Wildschwein (Leber)				
507	Wildschwein (Lunge)	3	AsM	57719 ± 2892	2866 ± 151
508	Wildschwein (Herz)	3	AsM	153896 ± 7769	5873 ± 318
509	Wildschwein (Niere)	3	TM	7935 ± 397	239 ± 15
510	Schwein (Muskeln)	3	AsM	1036 ± 52	5058 ± 265
511	Schwein (Niere)	3	TM	$72,2\pm4,0$	336 ± 24
512	Schwein (Leber)				
513	Schwein (Schilddrüse)				
514	Schwein (Knochen)	3	AsM	$54{,}6\pm 3{,}0$	288 ± 18
515	Schwein (Kiefer/Zähne)				
516	Schwein (Muskeln)	3	AsM	4230 ± 212	5287 ± 276
517	Schwein (Niere)				
518	Schwein (Leber)	3	AsM	1629 ± 82	2993 ± 161
519	Schwein (Schilddrüse)				
520	Schwein (Knochen)	3	AsM	$76,4\pm4,3$	116 ± 13
521	Schwein (Kiefer/Zähne)	3	AsM	$19,9 \pm 1,1$	$33,5 \pm 4,5$
522	Ziegenmilch	3	TM	$126,9\pm6,9$	264 ± 21
523	Milch	3	TM	475 ± 24	390 ± 30
524	Milch	3	TM	$63,0\pm3,9$	343 ± 28
525	Ziegenmilch	3	TM	$135,7 \pm 7,3$	251 ± 21
526	Milch	3	TM	533 ± 27	331 ± 25
527	Milch	3	TM	239 ± 12	248 ± 20
528	Milch	3	TM	$179,0\pm9,4$	255 ± 19
529	Milch	3	TM	1014 ± 51	452 ± 27
530	Milch	3	TM	221 ± 11	462 ± 27
531	Milch	3	TM	$164,0 \pm 8,4$	323 ± 19
532	Milch	3	TM	$154,3 \pm 8,3$	366 ± 27
533	Heu	3	TM	$104,5 \pm 5,5$	1362 ± 73
534	Heu	3	TM	$149,6 \pm 7,7$	373 ± 24
535	Heu	3	TM	$41,4 \pm 2,5$	506 ± 31
536	Heu	3	TM	$113,0 \pm 6,2$	523 ± 36
537	Heu	3	TM	778 ± 39	357 ± 25

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
538	Heu	3	TM	1337 ± 68	414 ± 37
539	Heu	3	TM	208 ± 11	394 ± 35
540	Heu	3	TM	1455 ± 73	475 ± 30
541	Heu	3	TM	$125,8\pm6,7$	283 ± 22
542	Heu	3	TM	320 ± 16	479 ± 31
543	Heu	3	TM	255 ± 14	324 ± 30
544	Schwein (Muskeln)	3	AsM	1423 ± 72	4214 ± 221
545	Schwein (Leber)	3	AsM	602 ± 31	3355 ± 178
546	Schwein (Schilddrüse)				
547	Schwein (Niere)	3	TM	$99,8 \pm 5,2$	367 ± 22
548	Schwein (Knochen)	3	AsM	$97,7 \pm 5,0$	184 ± 12
549	Schwein (Kiefer/Zähne)	3	AsM	55.1 ± 2.9	$104{,}0\pm7{,}3$
550	Reh (Muskeln)				
551	Reh (Leber)				
552	Reh (Niere)	3	TM	24530 ± 1229	268 ± 29
553	Reh (Knochen)				
554	Reh (Kiefer/Zähne)				
601	Milch	3	TM	1076 ± 54	336 ± 20
602	Milch	3	TM	$170,4\pm9,1$	509 ± 33
603	Milch	3	TM	$106,7\pm5,5$	465 ± 26
604	Milch	3	TM	102.2 ± 5.7	367 ± 27
605	Milch	3	TM	$108,3\pm5,7$	495 ± 30
606	Milch	3	TM	$102,1\pm5,7$	428 ± 30
607	Milch	3	TM	285 ± 14	364 ± 22
608	Milch	3	TM	858 ± 43	470 ± 32
609	Milch	3	TM	280 ± 15	357 ± 26
610	Ziegenmilch	3	TM	$73{,}2\pm4{,}2$	436 ± 30
611	Milch	3	TM	1136 ± 57	382 ± 26
612	Gras	3	TM	206 ± 11	434 ± 27
613	Gras	3	TM	236 ± 12	338 ± 26
614	Gras	3	TM	293 ± 15	433 ± 32
615	Gras	3	TM	2394 ± 121	417 ± 29
616	Gras	3	TM	2385 ± 120	397 ± 30
617	Gras	3	TM	362 ± 19	736 ± 45
618	Gras	3	TM	365 ± 19	671 ± 42
619	Gras	3	TM	$118,5\pm6,2$	722 ± 41
620	Boden u. Gras	3	TM	1848 ± 93	345 ± 19
621	Boden u. Gras	3	TM	1817 ± 91	267 ± 17
622	Boden u. Gras	3	TM	1764 ± 88	182 ± 12
623	Boden u. Gras	3	TM	9817 ± 492	350 ± 20
624	Boden u. Gras	3	TM	8632 ± 432	598 ± 32
625	Boden u. Gras	3	TM	6239 ± 313	251 ± 16
626	Boden u. Gras	3	TM	5142 ± 257	272 ± 15
627	Boden u. Gras	3	TM	2685 ± 134	279 ± 15
628	Hauserdbeeren	3	TM	$25{,}9\pm2{,}0$	494 ± 33
629	Hauserdbeeren	3	TM	$107,5\pm5,5$	459 ± 26

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq} \ \mathrm{kg}^{-1}]$
630	Boden u. Hauserdbeeren	3	TM	1346 ± 67	311 ± 17
631	Boden u. Hauserdbeeren	3	TM	2377 ± 119	$61,7 \pm 4,2$
632	Sauerampfer	3	TM	$77,8 \pm 4,2$	1257 ± 69
633	Boden u. Sauerampfer	3	TM	1277 ± 64	351 ± 19
634	Kopfsalat	3	TM	436 ± 22	2032 ± 111
635	Kopfsalat	3	TM	913 ± 46	1705 ± 97
636	Boden u. Kopfsalat	3	TM	872 ± 44	274 ± 15
637	Boden u. Kopfsalat	3	TM	889 ± 45	293 ± 16
639	Waldhimbeeren	3	TM	2765 ± 139	275 ± 18
640	Waldhimbeeren	3	TM	23200 ± 1161	220 ± 14
641	Waldhimbeeren	3	TM	11048 ± 553	252 ± 19
642	OA u. Waldhimbeeren	3	TM	19884 ± 1002	189 ± 29
643	OA u. Waldhimbeeren	3	TM	98019 ± 4926	134 ± 31
644	OA u. Waldhimbeeren	3	TM	43592 ± 2191	146 ± 32
645	Boden u. Waldhimbeeren	3	TM	5406 ± 271	$118,9\pm7,0$
646	Boden u. Waldhimbeeren	3	TM	52614 ± 2634	$123,7\pm7,4$
647	Boden u. Waldhimbeeren	3	TM	8242 ± 413	$127,7\pm8,8$
648	Walderdbeeren	3	TM	2899 ± 146	397 ± 27
649	Walderdbeeren	3	TM	232 ± 12	427 ± 29
650	Walderdbeeren	3	TM	3394 ± 170	365 ± 21
651	OA u. Walderdbeeren	3	TM	5699 ± 287	135 ± 17
652	OA u. Walderdbeeren	3	TM	1392 ± 70	290 ± 28
653	OA u. Walderdbeeren	3	TM	7268 ± 366	168 ± 20
654	Boden u. Walderdbeeren	3	TM	1655 ± 83	$85,9\pm6,4$
655	Boden u. Walderdbeeren	3	TM	4501 ± 225	176 ± 10
656	Boden u. Walderdbeeren	3	TM	839 ± 42	$95{,}4\pm 6{,}9$
657	Heidelbeeren	3	TM	71924 ± 3601	208 ± 15
658	Heidelbeeren	3	TM	17273 ± 865	166 ± 17
659	OA u. Heidelbeeren	3	TM	42577 ± 2144	50 ± 10
660	OA u. Heidelbeeren	3	TM	16372 ± 823	154 ± 29
661	Boden u. Heidelbeeren	3	TM	2178 ± 109	$102,6\pm7,7$
662	Boden u. Heidelbeeren	3	TM	$136,0\pm6,9$	$83,1\pm5,7$
663	Heidelbeeren	3	TM	105287 ± 5271	182 ± 16
664	Heidelbeeren	3	TM	95473 ± 4779	188 ± 12
665	Heidelbeeren	3	TM	31657 ± 1585	220 ± 13
666	OA u. Heidelbeeren	3	TM	90138 ± 4535	70 ± 18
667	OA u. Heidelbeeren	3	TM	94014 ± 4727	73 ± 16
668	OA u. Heidelbeeren	3	TM	42744 ± 2147	96 ± 28
669	Boden u. Heidelbeeren	3	TM	1407 ± 70	$64{,}4\pm4{,}0$
670	Boden u. Heidelbeeren	3	TM	780 ± 39	$34{,}8\pm3{,}2$
671	Boden u. Heidelbeeren	3	TM	2040 ± 102	$70,7\pm4,1$
672	Preiselbeeren	3	TM	42873 ± 2147	197 ± 13
673	Boden u. Preiselbeeren	3	TM	1140 ± 57	$70,6\pm5,0$
674	Steinpilze	3	TM	20559 ± 1029	866 ± 47
675	Steinpilze	3	TM	217505 ± 10889	722 ± 39
676	Steinpilze	3	TM	10779 ± 540	555 ± 30
				$^{137}\mathrm{Cs}$	40 K
-----	------------------------	---------	-------	-----------------------------------	-----------------------------------
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
677	OA u. Steinpilzen	3	TM	10252 ± 514	44 ± 11
678	OA u. Steinpilzen	3	TM	2250 ± 113	58 ± 15
679	OA u. Steinpilzen	3	TM	8202 ± 411	45 ± 14
680	Boden u. Steinpilzen	3	TM	3129 ± 152	$145,6 \pm 8,3$
681	Boden u. Steinpilzen	3	TM	10172 ± 509	$117,8\pm6,8$
682	Boden u. Steinpilzen	3	TM	989 ± 50	$87,0\pm5,3$
683	Pfifferlinge	3	TM	11551 ± 579	1508 ± 81
684	Pfifferlinge	3	TM	5428 ± 273	1264 ± 77
685	Pfifferlinge	3	TM	27296 ± 1367	1295 ± 70
686	OA u. Pfifferlingen	3	TM	2480 ± 124	$55,9\pm6,6$
687	OA u. Pfifferlingen	3	TM	2355 ± 118	$56,1\pm7,5$
688	OA u. Pfifferlingen	3	TM	69055 ± 3458	$65,7\pm7,8$
689	Boden u. Pfifferlingen	3	TM	635 ± 32	$69,8\pm4,7$
690	Boden u. Pfifferlingen	3	TM	429 ± 22	$115,3\pm7,7$
691	Boden u. Pfifferlingen	3	TM	3019 ± 151	171 ± 10
692	Butterpilze	3	TM	880538 ± 44083	538 ± 33
693	Butterpilze	3	TM	772590 ± 38678	616 ± 37
694	Butterpilze	3	TM	919199 ± 46016	699 ± 41
695	OA u. Butterpilzen	3	TM	21353 ± 1069	$54,7\pm8,6$
696	OA u. Butterpilzen	3	TM	25026 ± 1256	66 ± 13
697	OA u. Butterpilzen	3	TM	11040 ± 553	64 ± 10
698	Boden u. Butterpilzen	3	TM	1176 ± 59	$79,4\pm5,7$
699	Boden u. Butterpilzen	3	TM	6858 ± 343	$105{,}4\pm 6{,}5$
700	Boden u. Butterpilzen	3	TM	13892 ± 695	$96,7\pm5,8$
701	Birkenpilze	3	TM	257044 ± 12868	752 ± 40
702	Birkenpilze	3	TM	15338 ± 769	1454 ± 84
703	Birkenpilze	3	TM	540666 ± 27068	911 ± 49
704	OA u. Birkenpilzen	3	TM	651 ± 33	55 ± 10
705	OA u. Birkenpilzen	3	TM	17681 ± 886	50 ± 12
706	OA u. Birkenpilzen	3	TM	33915 ± 1702	101 ± 27
707	Boden u. Birkenpilzen	3	TM	18811 ± 942	$73,9 \pm 4,9$
708	Boden u. Birkenpilzen	3	TM	575 ± 29	$104{,}9\pm6{,}5$
709	Boden u. Birkenpilzen	3	TM	2620 ± 131	$64,2\pm4,4$
710	Rotkappe	3	TM	54347 ± 2721	883 ± 47
711	Rotkappe	3	TM	53677 ± 2687	854 ± 46
712	Rotkappe	3	TM	1989 ± 100	1090 ± 59
713	OA u. Rotkappe	3	TM	18557 ± 932	71 ± 20
714	OA u. Rotkappe	3	TM	9008 ± 451	91 ± 13
715	OA u. Rotkappe	3	TM	982 ± 49	$78,4\pm9,1$
716	Boden u. Rotkappe	3	TM	8370 ± 419	$92,3\pm6,9$
717	Boden u. Rotkappe	3	TM	2525 ± 126	$73,0 \pm 4,5$
718	Boden u. Rotkappe	3	TM	$174,0\pm8,\!8$	$86,8\pm5,8$
719	Körniger Frischkäse	3	TM	$164{,}6\pm8{,}9$	126 ± 16
720	Körniger Frischkäse	3	TM	$143,5\pm7,4$	186 ± 14
721	Körniger Frischkäse	3	TM	84.7 ± 4.8	135 ± 17
722	Körniger Frischkäse	3	TM	205 ± 11	158 ± 18

B Tabellen und Abbildungen

				^{137}Cs	40 K
Nr.	Probenmaterial	Messung	Bezug	$[{ m Bq~kg^{-1}}]$	$[\mathrm{Bq}\ \mathrm{kg}^{-1}]$
723	Erbsen	3	TM	$13{,}9\pm1{,}0$	463 ± 27
724	Erbsen	3	TM	$96,0\pm4,9$	481 ± 26
725	Boden u. Erbsen	3	TM	1034 ± 52	325 ± 18
726	Boden u. Erbsen	3	TM	2320 ± 116	345 ± 22
727	Roggen	3	TM	$10,5\pm1,1$	164 ± 15
728	Roggen	3	TM	$6,3\pm0,5$	157 ± 10
729	Boden u. Roggen	3	TM	790 ± 40	330 ± 18
730	Boden u. Roggen	3	TM	1382 ± 69	282 ± 18
731	Hafer	3	TM	34.8 ± 1.8	$150,1\pm8,\!8$
732	Hafer	3	TM	$27,1\pm1,7$	158 ± 13
733	Hafer	3	TM	$21,0\pm1,3$	184 ± 13
734	Boden u. Hafer	3	TM	5726 ± 287	238 ± 13
735	Boden u. Hafer	3	TM	606 ± 30	237 ± 14
736	Boden u. Hafer	3	TM	1372 ± 69	349 ± 19
737	Mais	3	TM	$5{,}7\pm0{,}6$	169 ± 12
738	Mais	3	TM	$14{,}2\pm0{,}9$	$129{,}7\pm9{,}0$
739	Mais	3	TM	$2{,}9\pm 0{,}3$	$144,1\pm9,4$
740	Boden u. Mais	3	TM	1276 ± 64	308 ± 18
741	Boden u. Mais	3	TM	4452 ± 223	231 ± 13
742	Boden u. Mais	3	TM	743 ± 37	297 ± 18
743	Weizen	3	TM	$5,2\pm0,5$	143 ± 10
744	Weizen	3	TM	$9{,}4\pm0{,}6$	161 ± 10
745	Weizen	3	TM	$7{,}5\pm{0{,}5}$	169 ± 10
746	Boden u. Weizen	3	TM	899 ± 45	338 ± 19
747	Boden u. Weizen	3	TM	1086 ± 54	340 ± 19
748	Boden u. Weizen	3	TM	844 ± 42	313 ± 18

Bemerkungen:

- Die Spalte "Messung" gibt Auskunft darüber, in welchem Rahmen die jeweilige Probe vermessen wurde. "1" kennzeichnet Bodenproben, die im Herbst 2002 und Winter 2002/03 von einem Mitarbeiter des ZSR vermessen wurden. Mit "2" bzw. "3" sind Messungen gemeint, die im Rahmen von [Kal03] bzw. dieser Arbeit durchgeführt wurden.
- , $*_1$ ' steht für Messwerte aus nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen, die in den noch vorhandenen Unterlagen nicht verzeichnet waren.
- Mit ,*2' ist der Fall, dass der Wert des primären Messergebnisses unter der Nachweisgrenze liegt, gekennzeichnet. Dieser Fall ist nur bei im Rahmen von [Kal03] vorgenommenen Messungen eingetreten, wenn nicht ausreichende Messzeiten gewählt wurden.
- Die Spalte ,Bezug' informiert über den Verarbeitungszustand (getrocknet oder verascht), in dem die jeweilige Probe vermessen wurde und über den Massenbezug der angegebenen spezifischen Aktivität.
- Die angegebenen spezifischen ¹³⁷Cs-Aktivitäten sind auf den 01.01.2003 zerfallskorrigiert.

Nr.	Probenmaterial	226 Ra	228 Ra	224 Ra
69	Boden u. Gras	$31,1\pm1,1$	$27{,}9\pm1{,}9$	$26,3 \pm 1,3$
277	Boden u. Tomaten	$17{,}8\pm0{,}7$	$14{,}7\pm1{,}0$	$14,\!4\pm1,\!7$
308	Boden u. Weizen	$16{,}5\pm0{,}7$	$12{,}4\pm0{,}9$	$14{,}0\pm1{,}6$
317	Boden u. Roggen	$19{,}0\pm0{,}7$	$16{,}6\pm1{,}1$	$17{,}6\pm2{,}0$
321	Boden u. Roggen	$15{,}7\pm0{,}6$	$14{,}2\pm1{,}1$	$13{,}4\pm1{,}6$
425	Boden u. Gras	$26{,}9\pm1{,}0$	$23{,}4\pm1{,}6$	$24{,}8\pm2{,}8$
427	Boden u. Gras	$37,5\pm1,4$	$30{,}2\pm2{,}0$	$30{,}6\pm3{,}5$
435	Boden u. Gras	$17{,}2\pm0{,}7$	$18{,}0\pm1{,}3$	$16{,}2\pm1{,}9$
446	Boden u. Möhren	$16{,}9\pm0{,}7$	$16{,}3\pm1{,}4$	$13{,}9\pm1{,}6$
447	Boden u. Möhren	$17,2\pm0,7$	$13{,}7\pm1{,}0$	$14{,}3\pm1{,}7$
457	Boden u. Kohl	$16{,}5\pm0{,}7$	$14{,}0\pm1{,}2$	$11{,}5\pm0{,}6$
461	Boden u. Kohl	$13{,}6\pm0{,}6$	$10{,}5\pm0{,}8$	$11,5 \pm 1,4$
463	Boden u. Kohl	$17{,}3\pm0{,}7$	$13{,}5\pm1{,}0$	$12{,}3\pm0{,}6$
473	Boden u. Kartoffeln	$15{,}0\pm0{,}6$	$12{,}2\pm0{,}9$	$10{,}8\pm0{,}5$
489	Boden u. Rote Bete	$14{,}8\pm0{,}6$	$11{,}5\pm0{,}9$	$12,5\pm1,5$
490	Boden u. Rote Bete	$16{,}8\pm0{,}7$	$17{,}5\pm1{,}3$	$16{,}8\pm2{,}0$
633	Boden u. Sauerampfer	$22{,}2\pm0{,}9$	$21{,}6\pm1{,}5$	$21{,}7\pm2{,}5$
636	Boden u. Kopfsalat	$17{,}2\pm0{,}7$	$15{,}0\pm1{,}1$	$13{,}1\pm0{,}7$
656	Boden u. Walderdbeeren	$6{,}8\pm0{,}4$	$5{,}7\pm0{,}5$	$4{,}1\pm0{,}3$
662	Boden u. Heidelbeeren	$6{,}0\pm0{,}3$	$4{,}7\pm0{,}5$	$5{,}0\pm0{,}7$
670	Boden u. Heidelbeeren	$4{,}8\pm0{,}3$	$3{,}0\pm0{,}5$	$3,0\pm0,3$
682	Boden u. Steinpilzen	$6{,}0\pm 0{,}4$	$5{,}7\pm0{,}5$	$4{,}2\pm0{,}7$
689	Boden u. Pfifferlingen	$5{,}0\pm0{,}3$	$3{,}3\pm0{,}4$	$3,2\pm0,5$
690	Boden u. Pfifferlingen	$6{,}5\pm0{,}3$	$6{,}8\pm0{,}5$	$5{,}8\pm0{,}3$
708	Boden u. Birkenpilzen	$5{,}6\pm0{,}3$	$4{,}3\pm0{,}4$	$3,5\pm0,5$
718	Boden u. Rotkappe	$6,2\pm0,3$	$4{,}8\pm0{,}4$	$5{,}6\pm0{,}7$
725	Boden u. Erbsen	$16{,}8\pm0{,}7$	$15{,}1\pm1{,}2$	$13{,}9\pm1{,}7$
729	Boden u. Roggen	$18,1\pm0,7$	$16{,}3\pm1{,}1$	$16{,}4\pm1{,}9$
735	Boden u. Hafer	$14{,}0\pm0{,}6$	$11{,}8\pm0{,}9$	$10{,}5\pm1{,}3$
742	Boden u. Mais	$15{,}2\pm0{,}6$	$15{,}3\pm1{,}1$	$13{,}7\pm0{,}7$
746	Boden u. Weizen	$18{,}7\pm0{,}8$	$15{,}2\pm1{,}3$	$15{,}2\pm1{,}8$
748	Boden u. Weizen	$17{,}2\pm0{,}7$	$13{,}9\pm1{,}0$	$14{,}2\pm1{,}7$

Tabelle B.3: Übersicht über die spezifischen Aktivitäten von Zerfallsreihennuklide in untersuchten Bodenproben. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Tabelle B.4: Spezifikationen der im Rahmen dieser Arbeit zur Efficiency-Kalibrierung eingesetzten Multinuklidmischung.

Bezeichnung: QCY48

Vertrieb: AEA Technology QSA GmbH

Zertifiziert durch: Amersham plc

Referenzzeit: 12:00 Uhr GMT, 1. September 2003

Masse der Lösung (in 4M HCl): 5,3882 g
 (später verdünnt auf 265,2 g)

	Energie E_{γ}	γ -Emissionen	Erweiterte relative	
Radionuklid	[keV]	$[s^{-1} g^{-1}]$	Standardunsicherheit	k_s
²⁴¹ Am	59,54	1128	0,026	1
$^{109}\mathrm{Cd}$	88,03	641	0,062	1
$^{57}\mathrm{Co}$	122,1	588	0,015	1
$^{139}\mathrm{Ce}$	165,9	690	0,014	1
$^{203}\mathrm{Hg}$	279,2	1914	0,014	1
113 Sn	391,7	2085	0,032	1
$^{85}\mathrm{Sr}$	514,0	3974	0,025	1
^{137}Cs	661,6	2419	0,019	1
88 Y	898,0	6261	0,016	$1,\!12$
60 Co	1173	3376	0,015	$1,\!14$
60 Co	1333	3379	0,015	$1,\!13$
88 Y	1836	6618	0,013	1,14

B.1 Tabellen

Tabelle B.5: Vergleichswerte der PTB und Ergebnisse des Ringvergleichs aus [Sch98]. Bei den Werten der Spalte ,PTB' handelt es sich um die Vergleichswerte der PTB mit erweiterter Standardmessunsicherheit mit Erweiterungsfaktor 2. In der Spalte ,Vergleich' sind die Gesamtmittelwerte aller am Ringversuch teilnehmenden Labore, sowie die zugehörigen Vergleichsstandardabweichungen aufgelistet. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

	PTB		Verg	gleich
Nuklid	\mathcal{A}	$u(\mathcal{A})$	\mathcal{A}	$u(\mathcal{A})$
²³⁸ U	340	13	331	38
$^{235}\mathrm{U}$	$16,\!3$	0,7	16,1	2,8
226 Ra	258	13	249	38
228 Ra	$62,\!4$	2,1	56,1	3,1
$^{228}\mathrm{Th}$	$60,\!6$	1,8	58,7	6,1
$^{40}\mathrm{K}$	850	19	847	61
$^{137}\mathrm{Cs}$	$32,\!5$	1,2	32,4	2,1

Tabelle B.6: Messwerte der Ringvergleichsprobe für Flächenstandardpräparat A. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Nuklid	Detektor 1	Detektor 3	Detektor 4	Detektor 5
$^{238}\mathrm{U}$	306 ± 43	318 ± 33	303 ± 34	308 ± 29
$^{235}\mathrm{U}$	$15{,}3\pm1{,}7$	$15{,}5\pm1{,}4$	$16{,}9\pm1{,}8$	$14{,}6\pm1{,}7$
226 Ra	$243,9\pm8,1$	$239{,}6\pm8{,}0$	$257{,}6\pm8{,}6$	$251{,}6\pm8{,}4$
228 Ra	$60,9 \pm 4,2$	$55{,}1\pm4{,}6$	$52{,}7\pm3{,}6$	$54{,}4\pm3{,}7$
$^{228}\mathrm{Th}$	$60{,}4\pm 6{,}9$	$55{,}1\pm6{,}3$	$52{,}5\pm6{,}0$	$54{,}4\pm 6{,}2$
$^{40}\mathrm{K}$	799 ± 42	802 ± 42	813 ± 43	775 ± 40
$^{137}\mathrm{Cs}$	$27,5 \pm 1,5$	$27{,}3\pm1{,}5$	$28{,}1\pm1{,}5$	$29,3 \pm 1,5$

Tabelle B.7: Messwerte der Ringvergleichsprobe für Flächenstandardpräparat B. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Nuklid	Detektor 2	Detektor 4	Detektor 5
$^{238}\mathrm{U}$	337 ± 61	314 ± 35	313 ± 29
$^{235}\mathrm{U}$	$17{,}9 \pm 1{,}6$	$17{,}4\pm1{,}9$	$15{,}0\pm1{,}7$
226 Ra	$251{,}6\pm8{,}4$	$266,2\pm 8,9$	$255{,}0\pm8{,}5$
228 Ra	$50{,}9\pm3{,}6$	$54{,}6\pm3{,}8$	$55{,}2\pm3{,}7$
$^{228}\mathrm{Th}$	$57{,}3\pm 6{,}6$	$54{,}4\pm 6{,}2$	$55,0\pm6,\!3$
$^{40}\mathrm{K}$	872 ± 46	844 ± 44	790 ± 41
$^{137}\mathrm{Cs}$	$27{,}2\pm1{,}5$	$29{,}0\pm1{,}5$	$29{,}7\pm1{,}5$

Tabelle B.8: Messwerte der I	Ringvergleichsprobe f	für Flächenstanda	ardpräparat C.	Alle An-
gaben in Bq kg	-1.			

Nuklid	Detektor 5
$^{238}\mathrm{U}$	313 ± 29
$^{235}\mathrm{U}$	$15{,}7\pm1{,}8$
226 Ra	$261{,}9\pm8{,}7$
228 Ra	$55{,}6\pm3{,}8$
$^{228}\mathrm{Th}$	$55{,}3\pm6{,}3$
$^{40}\mathrm{K}$	801 ± 42
$^{137}\mathrm{Cs}$	$30{,}1\pm1{,}6$

Tabelle B.9: Messwerte der Ringvergleichsprobe für Flächenstandardpräparat D. Alle Angaben in Bq $\rm kg^{-1}.$

Nuklid	Detektor 2	Detektor 3	Detektor 4	Detektor 5
$^{238}\mathrm{U}$	306 ± 55	309 ± 49	291 ± 52	268 ± 34
$^{235}\mathrm{U}$	$16{,}7\pm1{,}9$	$15{,}0\pm1{,}5$	$17{,}8\pm1{,}9$	$14{,}7\pm1{,}5$
226 Ra	$246{,}6\pm8{,}3$	$247{,}6\pm8{,}3$	$257{,}7\pm8{,}7$	$247{,}0\pm8{,}2$
228 Ra	$49,0\pm3,8$	$50{,}8\pm3{,}8$	$55{,}7\pm4{,}0$	$53{,}6\pm3{,}7$
$^{228}\mathrm{Th}$	$48,2\pm5,9$	$50{,}4\pm 6{,}0$	$49{,}1\pm5{,}8$	$59,0\pm6,7$
$^{40}\mathrm{K}$	861 ± 46	831 ± 44	871 ± 47	785 ± 41
$^{137}\mathrm{Cs}$	$26{,}6\pm1{,}6$	$25{,}9\pm1{,}5$	$28{,}7\pm1{,}6$	$28{,}3\pm1{,}5$

Tabelle B.10: Vergleich der Messwerte der spezifischen Aktivitäten von 137 Cs und 40 K für voneinander verschiedene Teilmengen M_1 , M_2 einiger Bodenproben. Alle Angaben in Bq kg⁻¹.

Probe	$M_1 \ (^{137}{\rm Cs})$	$M_2 \ (^{137}{\rm Cs})$	$M_1 ({}^{40}{ m K})$	$M_2 ({}^{40}\mathrm{K})$
478	6108 ± 306	6136 ± 307	368 ± 22	348 ± 22
655	4375 ± 219	4486 ± 225	177 ± 10	183 ± 11
662	$132{,}2\pm6{,}7$	$134{,}8\pm 6{,}8$	$83{,}1\pm5{,}7$	$73{,}1\pm5{,}2$
690	429 ± 22	433 ± 22	$115{,}3\pm7{,}7$	$116,0\pm8,7$
699	6858 ± 343	6701 ± 336	$105{,}4\pm 6{,}5$	$107{,}8\pm 6{,}8$
707	18326 ± 917	18812 ± 942	$73{,}7\pm5{,}9$	$73{,}9\pm4{,}9$
708	575 ± 29	565 ± 28	$104{,}9\pm6{,}5$	$93{,}4\pm7{,}1$
709	2867 ± 144	2620 ± 131	$66,7\pm4,8$	$64{,}2\pm4{,}4$

Probe	137 Cs (Grob)	^{137}Cs (Fein)	40 K (Grob)	40 K (Fein)
69	877 ± 44	872 ± 44	363 ± 20	374 ± 20
76	1065 ± 53	1065 ± 53	372 ± 20	377 ± 21
78	11123 ± 557	12764 ± 640	517 ± 29	518 ± 32
97	6644 ± 333	6820 ± 341	$129,0\pm7,\!3$	$131,0\pm7,\!8$
99	3236 ± 162	3153 ± 158	$155,1\pm9,1$	168 ± 11
191	6608 ± 331	6615 ± 331	276 ± 15	272 ± 15
193	8549 ± 428	8549 ± 428	258 ± 15	255 ± 14
263	2467 ± 124	2500 ± 125	$117{,}4\pm7{,}7$	$129{,}0\pm8{,}3$
277	767 ± 38	805 ± 40	309 ± 17	315 ± 17
308	916 ± 46	909 ± 46	320 ± 18	304 ± 18

Tabelle B.11: Vergleich der Messwerte der spezifischen Aktivität von $^{137}\mathrm{Cs}$ und $^{40}\mathrm{K}$ für unterschiedlich gesiebte Teilmengen ("Grob": $<2\,\mathrm{mm}$, "Fein": $<0,5\,\mathrm{mm}$) von Bodenproben. Alle Angaben in Bq kg^{-1} .

Tabelle B.12: Vergleich der Messungen spezifischer Aktivitäten von ¹³⁷Cs und ⁴⁰K in Bodenproben wie sie ursprünglich (Ende 2002 und Anfang 2003, Bez. ,ZSR 1') und im Rahmen dieser Arbeit (Bez. ,ZSR 2') durchgeführt wurden. Alle Angaben bezogen auf das Trockengewicht und in Bq kg⁻¹.

Probe	^{137}Cs (ZSR 1)	^{137}Cs (ZSR 2)	40 K (ZSR1)	${}^{40}K$ (ZSR 2)
69	895 ± 93	917 ± 46	369 ± 37	363 ± 20
76	1103 ± 111	1114 ± 56	444 ± 43	372 ± 20
78	*	11632 ± 583	566 ± 49	517 ± 29
79	6401 ± 558	4619 ± 231	353 ± 37	377 ± 21
97	8759 ± 931	6952 ± 348	144 ± 21	$129{,}0\pm7{,}3$
99	4362 ± 464	3386 ± 170	223 ± 24	$155,1\pm9,1$
188	1759 ± 191	1809 ± 91	309 ± 32	282 ± 17
191	7446 ± 836	6883 ± 345	362 ± 81	276 ± 15
193	9580 ± 1047	8907 ± 446	297 ± 30	258 ± 15
263	3360 ± 370	2570 ± 129	177 ± 18	$117,\!4\pm7,\!7$
277	884 ± 92	799 ± 40	339 ± 35	309 ± 17
308	1048 ± 115	954 ± 48	341 ± 34	320 ± 18
317	881 ± 97	792 ± 40	394 ± 39	338 ± 19
318	2499 ± 276	2209 ± 111	360 ± 36	320 ± 18
319	4478 ± 494	3685 ± 185	213 ± 22	181 ± 14
320	1910 ± 208	1619 ± 81	353 ± 34	305 ± 19
321	505 ± 55	472 ± 24	231 ± 26	254 ± 17

* Messwert liegt nicht vor.

Tabelle B.13: Vergleich der Messungen spezifischer Aktivitäten von ¹³⁷Cs in einigen Proben nach [Kal03] und im Rahmen dieser Arbeit. Die Spalte ,ZSR 1' listet die in [Kal03] angegebenen Werte auf und ,ZSR 1*' die Werte gemäß [Kal03] nach erneuter Auswertung. Die Spalte ,ZSR 2[‡]' enthält die Werte aus Messungen im Rahmen dieser Arbeit, wobei die Trockenmasse auf die vermutlich in [Kal03] verwendete korrigiert wurde. Die Spalte ,ZSR 2' enthält die Werte aus Messungen im Rahmen dieser Arbeit. Alle Angaben bezogen auf das Datum der Probennahme und in Bq kg⁻¹.

Probe	Material	^{137}Cs (ZSR 1)	^{137}Cs (ZSR 1*)	$^{137}\mathrm{Cs}~(\mathrm{ZSR}~2^{\ddagger})$	^{137}Cs (ZSR 2)
14	Heu	735 ± 39	813 ± 43	846 ± 43	920 ± 46
19	Heu	653 ± 33	707 ± 36	667 ± 34	724 ± 37
127	Flusssch.	1020 ± 51	1039 ± 52	992 ± 50	1004 ± 50
149	Gras	879 ± 44	954 ± 48	851 ± 43	914 ± 46
172	Gras	170.8 ± 9.4	188 ± 10	$162,5\pm8,4$	$176,1\pm9,1$
2	Milch	$118,3\pm7,4$	$115{,}3\pm7{,}3$	$116{,}7\pm 6{,}1$	$118,\!4\pm6,\!2$
163	Milch	251 ± 13	255 ± 13	256 ± 13	270 ± 14
164	Milch	273 ± 14	283 ± 14	275 ± 14	288 ± 15
169	Milch	1519 ± 76	1578 ± 79	1416 ± 71	1483 ± 74
296	Tabak	339 ± 17	385 ± 20	303 ± 15	342 ± 17
305	Weizen	$5,7\pm0,5$	$6,7\pm0,5$	$6{,}9\pm{0{,}5}$	$7{,}9\pm0{,}6$
315	Roggen	$5,0\pm1,0$	$5,9\pm1,3$	$6{,}8\pm0{,}5$	$7{,}7\pm0{,}5$

Tabelle B.14: Vergleich der Messungen spezifischer Aktivitäten von ⁴⁰K in ausgewählten Proben nach [Kal03] und im Rahmen dieser Arbeit. Bezeichnungen wie in Tabelle B.13. Alle Angaben bezogen auf das Datum der Probennahme und in Bq kg⁻¹.

Probe	Material	40 K (ZSR 1)	40 K (ZSR 1*)	$^{40}\mathrm{K}~(\mathrm{ZSR}~2^{\ddagger})$	${}^{40}K$ (ZSR 2)
14	Heu	389 ± 55	432 ± 62	386 ± 24	420 ± 26
19	Heu	289 ± 21	320 ± 24	281 ± 21	305 ± 23
127	Flusssch.	$174,9\pm9,7$	182 ± 10	$157{,}6\pm9{,}2$	$159,4\pm9,3$
149	Gras	509 ± 28	566 ± 32	519 ± 32	557 ± 35
172	Gras	324 ± 33	359 ± 36	291 ± 20	316 ± 22
2	Milch	275 ± 41	280 ± 42	299 ± 19	303 ± 20
163	Milch	446 ± 27	455 ± 28	382 ± 22	403 ± 24
164	Milch	527 ± 31	538 ± 33	566 ± 36	591 ± 37
169	Milch	418 ± 26	427 ± 27	378 ± 22	396 ± 23
296	Tabak	1475 ± 79	1709 ± 94	1648 ± 89	1862 ± 100
305	Weizen	$128,3\pm9,1$	152 ± 11	$130,2\pm8,4$	$148,0\pm9,5$
315	Roggen	113 ± 19	134 ± 23	$126{,}6\pm7{,}9$	144.9 ± 9.1

Nr.	Probenmaterial	Bezugsmaterial	^{137}Cs (TM)	^{137}Cs (FM)	${}^{40}{ m K}$ (TM)	40 K (FM)
54	Gras	Boden	$0{,}10{}0{,}01$	$0{,}016 \pm 0{,}002$	$2,0\pm0,2$	$0{,}30\pm0{,}04$
55	Gras	Boden	$0{,}08\pm0{,}01$	$0{,}012 \pm 0{,}001$	$2,7\pm0,2$	$0{,}40\pm0{,}03$
56	Gras	Boden	$0{,}06\pm0{,}01$	$0{,}009 \pm 0{,}001$	$2{,}6\pm 0{,}3$	$0{,}38\pm0{,}04$
57	Gras	Boden	$0{,}06\ \pm 0{,}01$	$0{,}010 \pm 0{,}001$	$2{,}6\pm 0{,}3$	$0{,}38\pm0{,}05$
58	Gras	Boden	$0{,}10{}0{,}01$	$0{,}015 \pm 0{,}002$	$2,2\pm0,3$	$0{,}33\pm0{,}04$
59	Gras	Boden	$0{,}05\pm0{,}01$	$0{,}008 \pm 0{,}001$	$2,2\pm0,3$	$0{,}33\pm0{,}04$
60	Gras	Boden	$0{,}05\pm0{,}01$	$0{,}008 \pm 0{,}001$	$3,3\pm0,4$	$0{,}49\pm0{,}06$
61	Gras	Boden	$0{,}07\pm0{,}01$	$0{,}010\pm 0{,}001$	$2,1\pm0,2$	$0{,}31\pm0{,}04$
62	Gras	Boden	$0{,}10{}0{,}01$	$0{,}015 \pm 0{,}001$	$2,2\pm0,2$	$0{,}34\pm0{,}03$
63	Gras	Boden	$0{,}31\pm0{,}03$	$0,\!047 \pm 0,\!005$	$1,2\pm0,1$	$0{,}18\pm0{,}02$
64	Gras	Boden	$0{,}19\pm0{,}01$	$0{,}028 \pm 0{,}002$	$1,0\pm0,1$	$0{,}15\pm0{,}01$
65	Gras	Boden	$0{,}15\pm0{,}01$	$0{,}022\pm 0{,}002$	$1,4\pm0,1$	$0{,}22\pm0{,}02$
66	Gras	Boden	$0{,}06\ \pm 0{,}01$	$0{,}009 \pm 0{,}001$	$1,9\pm0,2$	$0{,}28\pm0{,}03$
82	Sauerampfer	Boden	$0{,}22\pm0{,}03$	$0,\!044 \pm 0,\!005$	$6,3\pm0,3$	$1{,}25\pm0{,}07$
83	Sauerampfer	Boden	$0{,}23\pm0{,}03$	$0,\!046\pm0,\!005$	$6,4\pm0,3$	$1{,}28\pm0{,}07$
84	Sauerampfer	Boden	$0{,}19\pm0{,}02$	$0{,}038 \pm 0{,}004$	$5,5\pm0,4$	$1{,}10\pm0{,}08$
85	Sauerampfer	Boden	$0{,}15\pm0{,}02$	$0{,}029 \pm 0{,}004$	$5,6\pm0,3$	$1{,}12\pm0{,}06$
87	Sauerampfer	Boden	$0{,}17\pm0{,}01$	$0{,}033 \pm 0{,}002$	$7{,}6\pm 0{,}6$	$1{,}52\pm0{,}13$
88	Sauerampfer	Boden	$0{,}16\pm0{,}01$	$0{,}032 \pm 0{,}002$	$11{,}0\pm0{,}6$	$2{,}18\pm0{,}12$
89	Sauerampfer	Boden	$0{,}22\pm0{,}03$	$0,\!044\pm0,\!005$		
90	Sauerampfer	Boden	$0{,}09\pm0{,}01$	$0{,}019\pm 0{,}002$	$7{,}6~\pm 0{,}4$	$1{,}51\pm0{,}08$
91	Petersilie	Boden	$0{,}097 \pm 0{,}012$	$0{,}0116 \pm 0{,}0014$	$5,0\pm0,6$	$0{,}59\pm0{,}07$
114	Gras	Boden	$0{,}05\pm0{,}01$	$0{,}008 \pm 0{,}001$	$1,1\pm0,2$	$0{,}16\pm0{,}02$
115	Gras	Boden	$0{,}11\pm0{,}01$	$0{,}016 \pm 0{,}002$	$1{,}6\pm 0{,}2$	$0{,}24\pm0{,}03$
116	Gras	Boden	$0{,}10{}0{,}01$	$0{,}015 \pm 0{,}002$	$1,2\pm0,2$	$0{,}18\pm0{,}02$
117	Gras	Boden			$3,3\pm0,4$	$0{,}50\pm0{,}06$
118	Gras	Boden	$0{,}029 \pm 0{,}004$	$0{,}004\pm0{,}001$	$5,8\pm0,7$	$0{,}88\pm0{,}11$
141	Gras	Boden	$0{,}78\pm0{,}10$	$0{,}117\pm0{,}015$	$1,8\pm0,3$	$0{,}27\pm0{,}04$
142	Gras	Boden	$0{,}19\pm0{,}02$	$0{,}028 \pm 0{,}004$	$1,9\pm0,3$	$0{,}28\pm0{,}04$
143	Gras	Boden	$0{,}82\pm0{,}10$	$0{,}123 \pm 0{,}015$	$1,7\pm0,2$	$0{,}25\pm0{,}04$
145	Gras	Boden	$0{,}05\pm0{,}01$	$0{,}008 \pm 0{,}001$	$1,2\pm0,1$	$0{,}17\pm0{,}02$
146	Gras	Boden	$0{,}13\pm0{,}01$	$0{,}019 \pm 0{,}002$	$1,0\pm0,2$	$0{,}15\pm0{,}02$
147	Gras	Boden	$0{,}19\pm0{,}02$	$0{,}029 \pm 0{,}003$	$0,9\pm0,1$	$0{,}14\pm0{,}02$
148	Gras	Boden	$0{,}09\pm0{,}01$	$0{,}014 \pm 0{,}002$	$2,3\pm0,3$	$0,\!34\pm0,\!05$
149	Gras	Boden	$0{,}17\pm0{,}02$	$0{,}025 \pm 0{,}003$	$1,9\pm0,2$	$0{,}28\pm0{,}03$
150	Gras	Boden	$0{,}13\pm0{,}02$	$0{,}019 \pm 0{,}002$	$1,3\pm0,2$	$0{,}19\pm0{,}03$
172	Gras	Boden	$0{,}11\pm0{,}01$	$0{,}016 \pm 0{,}002$	$1,1\pm0,1$	$0{,}16\pm0{,}02$
173	Gras	Boden	$0{,}09\pm0{,}01$	$0{,}013 \pm 0{,}002$	$2,5\pm0,3$	$0,\!37\pm0,\!05$
174	Gras	Boden	$0{,}25\pm0{,}03$	$0,\!037 \pm 0,\!004$	$1,6\pm0,2$	$0{,}24\pm0{,}03$
175	Gras	Boden	$0{,}41\pm0{,}05$	$0,\!061 \pm 0,\!007$	$1,9\pm0,2$	$0{,}28\pm0{,}03$
176	Gras	Boden	$0{,}14\pm0{,}02$	$0{,}022 \pm 0{,}003$	$1,8\pm0,2$	$0{,}27\pm0{,}03$
177	Gras	Boden	$0{,}16\pm0{,}01$	$0{,}024 \pm 0{,}002$	$1,5\pm0,1$	$0{,}23\pm0{,}02$
180	Gras	Boden	$0{,}09\pm0{,}01$	$0{,}013 \pm 0{,}001$	$2{,}0\pm 0{,}2$	$0{,}31\pm0{,}02$
181	Gras	Boden	$0{,}26\pm0{,}03$	$0,038 \pm 0,005$	$2{,}4\pm0{,}3$	$0,\!36\pm0,\!04$
182	Gras	Boden	$0{,}24\pm0{,}02$	$0,037 \pm 0,003$	$2,1\pm0,2$	$0,\!32\pm0,\!04$

Tabelle B.15: Übersicht über die Transferfaktoren (Konzentrationsverhältnisse) der Einzelproben.

B Tabellen und Abbildungen

Nr.	Probenmaterial	Bezugsmaterial	^{137}Cs (TM)	^{137}Cs (FM)	${}^{40}{ m K}$ (TM)	40 K (FM)
194	Waldhimbeeren	Boden	$0{,}84\pm0{,}10$	$0{,}13\pm0{,}02$		
		OA	$0{,}13\pm0{,}01$	$0{,}020\pm0{,}001$		
195	Waldhimbeeren	Boden	$1{,}53\pm0{,}18$	$0{,}24\pm0{,}03$	$2,3\pm0,3$	$0,\!35\pm0,\!05$
196	Waldhimbeeren	Boden	$0,\!96\pm0,\!12$	$0{,}15\pm0{,}02$	$1,8\pm0,3$	$0{,}28\pm0{,}04$
		OA	$0{,}08\pm0{,}01$	$0{,}012\pm0{,}001$	$1,1\pm0,3$	$0{,}18\pm0{,}04$
197	Waldhimbeeren	Boden	$0{,}72\pm0{,}09$	$0{,}11\pm0{,}01$	$2{,}1\pm 0{,}3$	$0{,}33\pm0{,}05$
198	Waldhimbeeren	Boden	$1,\!24\pm0,\!15$	$0{,}19\pm0{,}02$	$1,5\pm0,2$	$0{,}24\pm0{,}03$
		OA	$0{,}30\pm0{,}02$	$0,\!047 \pm 0,\!003$	$2,3\pm0,7$	$0,\!36\pm0,\!12$
209	Haushimbeeren	Boden	$0{,}28\pm0{,}03$	$0{,}043 \pm 0{,}005$	$1,3\pm0,2$	$0{,}21\pm0{,}03$
210	Haushimbeeren	Boden			$1,0\pm0,1$	$0{,}15\pm0{,}02$
213	Heidelbeeren	Boden			$4{,}0\pm1{,}5$	$0{,}60\pm0{,}22$
214	Heidelbeeren	Boden	165 ± 20	$25,0\pm3,0$	$2{,}5\pm 0{,}4$	$0,\!37\pm0,\!06$
		OA	$0{,}46\pm0{,}03$	$0,\!069\pm0,\!005$	$1,8\pm0,6$	$0{,}28\pm0{,}09$
215	Heidelbeeren	Boden	$20,0\pm2,1$	$3{,}0\pm0{,}3$	$3,0\pm0,5$	$0{,}46\pm0{,}07$
		OA	$1{,}09\pm0{,}08$	$0,\!16\pm0,\!01$		
216	Heidelbeeren	Boden	$3{,}6\pm0{,}4$	$0{,}54\pm0{,}07$	$1,8\pm0,3$	$0{,}27\pm0{,}04$
		OA	$0,\!35\pm0,\!02$	$0,\!052\pm0,\!004$	$1,6\pm0,3$	$0{,}24\pm0{,}04$
217	Heidelbeeren	Boden	$61,2\pm5,4$	$9{,}2\pm0{,}8$	$2{,}4\pm 0{,}3$	$0,\!36\pm0,\!04$
		OA	$0{,}62\pm0{,}04$	$0{,}09\pm0{,}01$	$1,1\pm0,2$	$0{,}17\pm0{,}03$
218	Heidelbeeren	Boden	$1{,}2\pm0{,}1$	$0{,}18\pm0{,}02$	$3,5\pm0,5$	$0{,}53\pm0{,}08$
		OA	$0{,}19\pm0{,}01$	$0{,}029 \pm 0{,}002$		
231	Steinpilze	Boden	$7{,}6\pm0{,}9$	$0,9\pm0,1$	$8{,}0\pm1{,}2$	$0{,}91\pm0{,}14$
		OA	$0,\!073 \pm 0,\!005$	$0{,}0083 \pm 0{,}0006$		
232	Steinpilze	Boden	$11{,}4\pm1{,}4$	$1{,}3\pm0{,}2$	$8{,}2\pm1{,}1$	$0{,}94\pm0{,}13$
		OA	$0{,}41\pm0{,}03$	$0,\!046\pm0,\!003$		
233	Steinpilze	Boden	$19{,}1\pm2{,}3$	$2{,}2\pm 0{,}3$	$13{,}6\pm2{,}0$	$1{,}55\pm0{,}23$
		OA	$0{,}91\pm0{,}06$	$0{,}104\pm0{,}007$		
234	Steinpilze	Boden			$3,7\pm0,7$	$0{,}42\pm0{,}08$
		OA	$0,\!92\pm0,\!06$	$0{,}104\pm0{,}007$	$9,7\pm2,9$	$1{,}10\pm0{,}33$
237	Steinpilze	Boden	$9{,}1\pm1{,}1$	$1,0\pm0,1$	$9{,}9 \pm 1{,}5$	$1{,}13\pm0{,}17$
		OA	$0{,}58\pm0{,}04$	$0{,}066\pm0{,}005$		
252	Pfifferlinge	Boden	$3{,}4\pm0{,}2$	$0{,}29\pm0{,}02$	$12{,}6\pm1{,}2$	$1{,}07\pm0{,}10$
		OA	$1{,}4\pm0{,}1$	$0{,}12\pm0{,}01$	$13{,}7\pm2{,}8$	$1{,}16\pm0{,}24$
253	Pfifferlinge	Boden	$5{,}8\pm0{,}7$	$0{,}50\pm0{,}06$	$12{,}2\pm1{,}6$	$1{,}04\pm0{,}14$
		OA	$1{,}4\pm0{,}1$	$0{,}12\pm0{,}01$		
254	Pfifferlinge	Boden	$11{,}6\pm1{,}4$	$0{,}99\pm0{,}12$	$9,9 \pm 1,3$	$0{,}84\pm0{,}11$
		OA	$1,1\pm0,1$	$0{,}09\pm0{,}01$	$16,3\pm2,7$	$1{,}39\pm0{,}23$
255	Pfifferlinge	OA	$2{,}5\pm0{,}2$	$0{,}21\pm0{,}01$		
256	Pfifferlinge	Boden	$6{,}4\pm0{,}8$	$0{,}54\pm0{,}07$	$12{,}4\pm1{,}6$	$1{,}05\pm0{,}14$
		OA	$0{,}69\pm0{,}05$	$0{,}058 \pm 0{,}004$		
267	Butterpilze	Boden	121 ± 15	$10,8\pm1,3$	$11,1\pm1,6$	$0{,}99\pm0{,}14$
		OA	$33{,}0\pm2{,}3$	$2{,}9\pm 0{,}2$	$4{,}6\pm0{,}5$	$0{,}41\pm0{,}05$
270	Tomaten	Boden	$0{,}109\pm 0{,}013$	$0{,}0063 \pm 0{,}0008$	$3,1\pm0,4$	$0{,}18\pm0{,}02$
271	Tomaten	Boden	$0,\!054 \pm 0,\!007$	$0{,}0031 \pm 0{,}0004$	$2{,}9\pm0{,}4$	$0{,}17\pm0{,}02$
273	Tomaten	Boden	$0{,}110\pm0{,}008$	$0{,}0064 \pm 0{,}0005$	$3,3\pm0,3$	$0{,}19\pm0{,}01$
274	Tomaten	Boden			$4{,}2\pm0{,}5$	$0{,}24\pm0{,}03$
275	Tomaten	Boden	$0{,}129\pm 0{,}016$	$0{,}0075 \pm 0{,}0009$	$6{,}2\pm0{,}7$	$0{,}36\pm0{,}04$

Nr.	Probenmaterial	Bezugsmaterial	^{137}Cs (TM)	^{137}Cs (FM)	${}^{40}{ m K}$ (TM)	${}^{40}{ m K}$ (FM)
282	Gurken	Boden	$0{,}09\pm0{,}01$	$0{,}0030\pm 0{,}0004$	$3,5 \pm 0,4$	$0{,}11\pm0{,}01$
283	Gurken	Boden	$0{,}08\pm0{,}01$	$0{,}0024 \pm 0{,}0003$	$5,6\pm0,7$	$0{,}18\pm0{,}02$
284	Gurken	Boden			$4,0\pm0,7$	$0{,}13\pm0{,}02$
285	Gurken	Boden	$0,\!47\pm0,\!06$	$0,015 \pm 0,002$	$4,8\pm0,6$	$0{,}15\pm0{,}02$
286	Gurken	Boden	$0,07\pm0,01$	$0,0021 \pm 0,0002$	$4,5 \pm 0,5$	$0,14 \pm 0,02$
292	Tabak	Boden	$0,\!44\pm0,\!05$	$0,044 \pm 0,005$	$3,2\pm0,3$	$0,32\pm0,03$
293	Tabak	Boden	0.37 ± 0.05	$0,037 \pm 0,005$	$3,9\pm0,5$	$0,\!39\pm0,\!05$
294	Tabak	Boden	$0,28 \pm 0,03$	$0,028 \pm 0,003$	$7,5 \pm 1,1$	$0,75 \pm 0,11$
295	Tabak	Boden	$0,29 \pm 0,04$	0.029 ± 0.004	5.0 ± 0.6	$0,50 \pm 0,06$
296	Tabak	Boden	0.47 ± 0.06	0.047 ± 0.006	$7,1 \pm 0,9$	$0,71 \pm 0.09$
302	Weizen	Boden	$0,0028 \pm 0,0004$	$0,0024 \pm 0,0003$	$0,72 \pm 0,09$	$0,63 \pm 0,08$
303	Weizen	Boden	$0,005 \pm 0,001$	0.005 ± 0.001	$0,33 \pm 0,07$	0.28 ± 0.06
304	Weizen	Boden	0.007 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.52 ± 0.08	0.46 ± 0.07
305	Weizen	Boden	0.011 ± 0.001	0.010 ± 0.001	0.66 ± 0.08	0.57 ± 0.07
306	Weizen	Boden	0.006 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.48 ± 0.06	0.42 ± 0.05
312	Roggen	Boden	0.016 ± 0.002	0.014 ± 0.002	0.43 ± 0.07	0.37 ± 0.06
313	Roggen	Boden	0.019 ± 0.002	0.016 ± 0.001	0.99 ± 0.16	0.86 ± 0.13
314	Roggen	Boden	0.019 ± 0.002	0.017 ± 0.002	0.44 ± 0.07	0.38 ± 0.06
315	Roggen	Boden	0.016 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.57 ± 0.05	0.49 ± 0.05
316	Roggen	Boden	0.008 ± 0.001	0.007 ± 0.001	0.56 ± 0.09	0.48 ± 0.08
414	Gras	Boden	0.77 ± 0.05	0.115 ± 0.008	1.1 ± 0.1	0.17 ± 0.02
415	Gras	Boden	0.09 ± 0.01	0.013 ± 0.001	0.9 ± 0.1	0.13 ± 0.01
416	Gras	Boden	0.049 ± 0.004	0.007 ± 0.001	3.1 ± 0.2	0.46 ± 0.04
417	Gras	Boden	0.023 ± 0.002	0.0035 ± 0.0003	1.7 ± 0.1	0.25 ± 0.02
418	Gras	Boden	0.32 ± 0.02	0.047 ± 0.003	0.9 ± 0.1	0.14 ± 0.01
419	Gras	Boden	0.08 ± 0.01	0.013 ± 0.001	0.9 ± 0.1	0.13 ± 0.01
420	Gras	Boden	0.09 ± 0.01	0.013 ± 0.001	$1,9 \pm 0,2$	$0,29 \pm 0,03$
421	Gras	Boden	$0,08 \pm 0,01$	$0,012 \pm 0,001$	$3,1\pm0,3$	$0,46 \pm 0,04$
422	Gras	Boden	$0,027 \pm 0,002$	$0,0040 \pm 0,0003$	$1,7 \pm 0,1$	$0,25\pm0,02$
423	Gras	Boden	$0,034 \pm 0,002$	$0,0052 \pm 0,0004$	$3,6\pm0,3$	$0,54 \pm 0,05$
424	Gras	Boden	$0,19\pm0,01$	$0,028 \pm 0,002$	$2,4 \pm 0,2$	$0,\!35\pm0,\!03$
438	Möhren	Boden	$0,07\pm0,01$	$0,009 \pm 0,001$	$3,2\pm0,3$	$0{,}38\pm0{,}03$
439	Möhren	Boden	$0,033 \pm 0,002$	$0,0039 \pm 0,0003$	$1,8 \pm 0,2$	$0,21 \pm 0,02$
440	Möhren	Boden	$0,030 \pm 0,003$	$0,0036 \pm 0,0003$	$3,3\pm0,3$	$0,39 \pm 0,03$
441	Möhren	Boden	$0,056 \pm 0,004$	$0,0065 \pm 0,0005$	$4,3\pm0,3$	$0,50 \pm 0,04$
448	Kohl	Boden	$0,020 \pm 0,002$	$0,0020 \pm 0,0001$	$5,1 \pm 0,4$	$0,50 \pm 0,04$
451	Kohl	Boden	$0,120 \pm 0,009$	$0,0116 \pm 0,0009$	$3,4\pm0,3$	$0,33\pm0,03$
452	Kohl	Boden	$0,015 \pm 0,001$	$0,0015 \pm 0,0001$	$3,8\pm0,3$	$0,37\pm0,03$
453	Kohl	Boden	$0,008 \pm 0,001$	$0,0007 \pm 0,0001$	$4,1 \pm 0,4$	$0,40 \pm 0,03$
454	Kohl	Boden	$0,115 \pm 0,009$	$0,0112 \pm 0,0008$	$4,2 \pm 0,4$	$0,41 \pm 0,04$
455	Kohl	Boden	$0,031 \pm 0,003$	$0,0030 \pm 0,0002$	$3,4 \pm 0,3$	$0,33\pm0,03$
465	Kartoffeln	Boden	$0,040 \pm 0,003$	$0,009 \pm 0,001$	$3,4\pm0,3$	$0,74\pm0,06$
466	Kartoffeln	Boden	$0,028 \pm 0,002$	$0,0062 \pm 0,0004$	$4,2 \pm 0,3$	$0,93\pm0,07$
467	Kartoffeln	Boden	$0,021 \pm 0,002$	$0,0046 \pm 0,0004$	$2,2 \pm 0,2$	$0,\!49 \pm 0,\!04$
469	Kartoffeln	Boden	$0,033 \pm 0,002$	$0,007 \pm 0,001$	$4,2\pm0,3$	$0,94\pm0,07$
470	Kartoffeln	Boden	$0,011 \pm 0,001$	$0,0025 \pm 0,0002$	$2,8\pm0,2$	$0,\!61 \pm 0,\!05$
471	Kartoffeln	Boden	$0,020 \pm 0,001$	$0,0043 \pm 0,0003$	$2,5\pm0,2$	$0,\!56\pm 0,\!04$

B Tabellen und Abbildungen

Nr.	Probenmaterial	Bezugsmaterial	^{137}Cs (TM)	^{137}Cs (FM)	${}^{40}{ m K}$ (TM)	${}^{40}{ m K}$ (FM)
480	Rote Bete	Boden	$0{,}085 \pm 0{,}006$	$0{,}0095 \pm 0{,}0007$	$2,9\pm0,2$	$0{,}33\pm0{,}03$
481	Rote Bete	Boden	$0,084 \pm 0,006$	$0{,}0094 \pm 0{,}0007$	$3,9\pm0,3$	$0{,}44\pm0{,}03$
482	Rote Bete	Boden	$0,055 \pm 0,004$	$0{,}0062 \pm 0{,}0005$	$4,7\pm0,4$	$0{,}52\pm0{,}04$
483	Rote Bete	Boden	$0,028 \pm 0,003$	$0{,}0031 \pm 0{,}0003$	$2,6\pm0,2$	$0{,}29\pm0{,}02$
486	Rote Bete	Boden	$0,031 \pm 0,002$	$0{,}0034 \pm 0{,}0003$	$4,7\pm0,4$	$0{,}52\pm0{,}04$
494	Butterpilze	Boden	145 ± 10	$12,9\pm0,9$	$7,9\pm0,7$	$0{,}70\pm0{,}07$
		OA	$23{,}5\pm1{,}7$	$2{,}1\pm0{,}1$	$8,2\pm0,8$	$0{,}73\pm0{,}07$
495	Butterpilze	Boden	163 ± 12	$14,5\pm1,0$	$6,6\pm0,5$	$0{,}58\pm0{,}05$
		OA	41.8 ± 3.0	$3,7\pm0,3$	$7,6\pm0,7$	$0{,}68\pm0{,}06$
496	Butterpilze	Boden	190 ± 13	$16,9\pm1,2$	$7,0\pm0,8$	$0{,}62\pm0{,}07$
		OA	$9,3\pm0,7$	$0,8\pm0,1$	$11{,}6\pm1{,}6$	$1{,}03\pm0{,}15$
497	Butterpilze	Boden	101 ± 7	$9{,}0\pm0{,}6$	$9,1\pm0,8$	$0{,}81\pm0{,}07$
		OA	$28,7\pm2,0$	$2{,}6\pm 0{,}2$	$8,4\pm0,8$	$0{,}74\pm0{,}07$
612	Gras	Boden	$0{,}11\pm0{,}01$	$0{,}017 \pm 0{,}001$	$1,3\pm0,1$	$0{,}19\pm0{,}02$
613	Gras	Boden	$0{,}13\pm0{,}01$	$0{,}020 \pm 0{,}001$	$1,3\pm0,1$	$0{,}19\pm0{,}02$
614	Gras	Boden	$0,\!17\pm0,\!01$	$0{,}025 \pm 0{,}002$	$2,4\pm0,2$	$0,\!36\pm0,\!04$
615	Gras	Boden	$0,\!24\pm0,\!02$	$0,\!037 \pm 0,\!003$	$1,2 \pm 0,1$	$0{,}18\pm0{,}02$
616	Gras	Boden	$0{,}28\pm0{,}02$	$0{,}041 \pm 0{,}003$	$0,7\pm0,1$	$0{,}10\pm0{,}01$
617	Gras	Boden	$0,058 \pm 0,004$	$0{,}009 \pm 0{,}001$	$2,9\pm0,3$	$0{,}44\pm0{,}04$
618	Gras	Boden	$0{,}07\pm0{,}01$	$0{,}011 \pm 0{,}001$	$2,5\pm0,2$	$0,\!37\pm0,\!03$
619	Gras	Boden	$0,044 \pm 0,003$	$0{,}0066 \pm 0{,}0005$	$2,6\pm0,2$	$0{,}39\pm0{,}03$
628	Hauserdbeeren	Boden	$0,019 \pm 0,002$	$0{,}0020 \pm 0{,}0002$	$1,6\pm0,1$	$0{,}17\pm0{,}01$
629	Hauserdbeeren	Boden	$0,045 \pm 0,003$	$0{,}0047 \pm 0{,}0003$	$7,4\pm0,7$	$0{,}78\pm0{,}07$
632	Sauerampfer	Boden	$0{,}11\pm0{,}01$	$0{,}013 \pm 0{,}001$	$4{,}6\pm 0{,}4$	$0{,}54\pm0{,}04$
634	Kopfsalat	Boden	$0{,}50\pm0{,}04$	$0{,}025 \pm 0{,}002$	$7,4\pm0,6$	$0,\!37\pm0,\!03$
635	Kopfsalat	Boden	$1{,}03\pm0{,}07$	$0,\!051\pm 0,\!004$	$5,8\pm0,5$	$0{,}29\pm0{,}02$
639	Waldhimbeeren	Boden	$0{,}51\pm0{,}04$	$0,\!079\pm 0,\!006$	$2,3\pm0,2$	$0,\!36\pm0,\!03$
		OA	$0{,}14\pm0{,}01$	$0{,}022 \pm 0{,}002$	$1,5\pm0,2$	$0{,}23\pm0{,}04$
640	Waldhimbeeren	Boden	$0{,}44\pm0{,}03$	$0,\!068\pm0,\!005$	$1,8\pm0,2$	$0{,}28\pm0{,}02$
		OA	$0,\!24\pm0,\!02$	$0{,}037 \pm 0{,}003$	$1{,}6\pm0{,}4$	$0,\!26\pm0,\!06$
641	Waldhimbeeren	Boden	$1,\!34\pm0,\!09$	$0{,}208 \pm 0{,}015$	$2,0\pm0,2$	$0{,}31\pm0{,}03$
		OA	$0,\!25\pm0,\!02$	$0{,}039 \pm 0{,}003$	$1,7\pm0,4$	$0,\!27\pm0,\!06$
648	Walderdbeeren	Boden	$1,75\pm0,12$	$0{,}184 \pm 0{,}013$	$4{,}6\pm0{,}5$	$0{,}49\pm0{,}05$
		OA	$0{,}51\pm0{,}04$	$0,\!053\pm0,\!004$	$2{,}9\pm 0{,}4$	$0{,}31\pm0{,}04$
649	Walderdbeeren	Boden	$0,\!052\pm0,\!004$	$0{,}0054 \pm 0{,}0004$	$2,4\pm0,2$	$0{,}25\pm0{,}02$
		OA	$0,\!17\pm0,\!01$	$0{,}018\pm0{,}001$	$1,5\pm0,2$	$0{,}15\pm0{,}02$
650	Walderdbeeren	Boden	$4{,}0\pm0{,}3$	$0{,}42\pm0{,}03$	$3,8\pm0,4$	$0{,}40\pm0{,}04$
		OA	$0,\!47\pm0,\!03$	$0{,}049 \pm 0{,}003$	$2,2\pm0,3$	$0{,}23\pm0{,}03$
657	Heidelbeeren	Boden	$33{,}0\pm2{,}3$	$5,0\pm0,4$	$2,0\pm0,2$	$0{,}31\pm0{,}03$
		OA	$1{,}69\pm0{,}12$	$0,\!26\pm0,\!02$	$4{,}1\pm 0{,}9$	$0{,}62\pm0{,}13$
658	Heidelbeeren	Boden	$127,0\pm9,0$	$19,2\pm1,4$	$2{,}0\pm0{,}3$	$0{,}30\pm0{,}04$
		OA	$1{,}06\pm0{,}07$	$0{,}16\pm0{,}01$	$1,1\pm0,2$	$0{,}16\pm0{,}03$
663	Heidelbeeren	Boden	74.8 ± 5.3	$11{,}3\pm0{,}8$	$2{,}8\pm0{,}3$	$0{,}43\pm0{,}05$
		OA	$1,\!17\pm0,\!08$	$0{,}18\pm0{,}01$	$2{,}6\pm 0{,}7$	$0{,}39\pm0{,}11$
664	Heidelbeeren	Boden	$122{,}4\pm8{,}7$	$18,5\pm1,3$	$5,4\pm0,6$	$0{,}82\pm0{,}09$
		OA	$1{,}02\pm0{,}07$	$0{,}15\pm0{,}01$	$2{,}6\pm0{,}6$	$0{,}39\pm0{,}09$
665	Heidelbeeren	Boden	$15,5 \pm 1,1$	$2,3\pm 0,2$	$3,1\pm0,3$	$0,\!47\pm0,\!04$

Nr.	Probenmaterial	Bezugsmaterial	^{137}Cs (TM)	^{137}Cs (FM)	${}^{40}{ m K}$ (TM)	40 K (FM)
665	Heidelbeeren	OA	$0,74 \pm 0,05$	$0{,}11\pm0{,}01$	$2,3\pm0,7$	$0,\!35\pm0,\!10$
672	Preiselbeeren	Boden	$37{,}6\pm2{,}7$	$5,6\pm0,4$	$2{,}8\pm 0{,}3$	$0{,}41\pm0{,}04$
674	Steinpilze	Boden	$6{,}6\pm 0{,}5$	$0,7\pm0,1$	$5,9\pm0,5$	$0{,}68\pm0{,}05$
		OA	$2{,}0\pm 0{,}1$	$0{,}23\pm0{,}02$	$19,9\pm5,1$	$2{,}27\pm0{,}58$
675	Steinpilze	Boden	20.8 ± 1.5	$2,4\pm0,2$	$6,1\pm0,5$	$0{,}70\pm0{,}06$
		OA	$96,7\pm6,9$	$11,0\pm0,8$	$12,\!4\pm3,\!2$	$1{,}42\pm0{,}37$
676	Steinpilze	Boden	$10{,}6\pm0{,}8$	$1,2\pm0,1$	$6,4\pm0,5$	$0{,}73\pm0{,}06$
		OA	$1,3\pm0,1$	$0{,}15\pm0{,}01$	$12{,}4\pm3{,}8$	$1{,}41\pm0{,}43$
683	Pfifferlinge	Boden	$17,7\pm1,3$	$1{,}50\pm0{,}11$	$21{,}6\pm1{,}9$	$1{,}84\pm0{,}16$
		OA	$4{,}7\pm 0{,}3$	$0{,}40\pm0{,}03$	$27,0\pm3,5$	$2{,}29\pm0{,}30$
684	Pfifferlinge	Boden	$12{,}3\pm0{,}9$	$1,\!05\pm0,\!07$	$11{,}0\pm1{,}0$	$0{,}93\pm0{,}08$
		OA	$2,3 \pm 0,2$	$0{,}20\pm0{,}01$	$22{,}5\pm3{,}3$	$1{,}92\pm0{,}28$
685	Pfifferlinge	Boden	$8{,}8\pm0{,}6$	$0,\!75\pm0,\!05$	$7{,}6\pm0{,}6$	$0{,}64\pm0{,}05$
		OA	$0{,}40\pm0{,}03$	$0{,}034 \pm 0{,}002$	$19,7 \pm 2,6$	$1{,}67 \pm 0{,}22$
692	Butterpilze	Boden	728 ± 52	$64{,}8\pm4{,}6$	$6,8\pm0,6$	$0{,}60\pm0{,}06$
		OA	41.2 ± 2.9	$3,7\pm0,3$	$9{,}8 \pm 1{,}7$	$0{,}88\pm0{,}15$
693	Butterpilze	Boden	109 ± 8	$9,7\pm0,7$	$5{,}8\pm 0{,}5$	$0{,}52\pm0{,}04$
		OA	$30{,}9\pm2{,}2$	$2{,}7\pm0{,}2$	$9{,}3\pm2{,}0$	$0{,}83\pm0{,}18$
694	Butterpilze	Boden	64 ± 5	$5{,}7\pm0{,}4$	$7{,}2\pm0{,}6$	$0{,}64\pm0{,}05$
		OA	83 ± 6	$7{,}4\pm0{,}5$	$10{,}9\pm1{,}8$	$0{,}97\pm0{,}16$
701	Birkenpilze	Boden	$13{,}3\pm0{,}9$	$1{,}02\pm0{,}07$	$10{,}2\pm0{,}9$	$0{,}78\pm0{,}07$
		OA	395 ± 28	$30{,}4\pm2{,}2$	$13{,}6\pm2{,}7$	$1{,}05\pm0{,}21$
702	Birkenpilze	Boden	$25{,}9\pm1{,}8$	$2{,}00\pm0{,}14$	$13{,}9\pm1{,}2$	$1{,}07\pm0{,}09$
		OA	$0,9\pm0,1$	$0,\!067 \pm 0,\!005$	$29,3\pm7,1$	$2{,}25\pm0{,}55$
703	Birkenpilze	Boden	201 ± 14	$15{,}4\pm1{,}1$	$14{,}2\pm1{,}2$	$1{,}09\pm0{,}10$
		OA	$15{,}9\pm1{,}1$	$1{,}23\pm0{,}09$	$9{,}0\pm2{,}4$	$0{,}69\pm0{,}19$
710	Rotkappe	Boden	$6{,}3\pm0{,}4$	$0{,}49\pm0{,}03$	$9{,}6\pm 0{,}9$	$0{,}74\pm0{,}07$
		OA	$2{,}9\pm 0{,}2$	$0{,}23\pm0{,}02$	$12{,}4\pm3{,}5$	$0{,}96\pm0{,}27$
711	Rotkappe	Boden	$20,7 \pm 1,5$	$1{,}59\pm0{,}11$	$11{,}7\pm1{,}0$	$0{,}90\pm0{,}07$
		OA	$6{,}0\pm0{,}4$	$0{,}46\pm0{,}03$	$9{,}4\pm1{,}4$	$0{,}72\pm0{,}11$
712	Rotkappe	Boden	$11,1\pm0,8$	$0{,}86\pm0{,}06$	$12{,}6\pm1{,}1$	$0{,}97\pm0{,}08$
		OA	$2{,}0\pm0{,}1$	$0{,}16\pm0{,}01$	$13{,}9\pm1{,}8$	$1{,}07\pm0{,}14$
723	Erbsen	Boden	$0,013 \pm 0,001$	$0{,}0030\pm 0{,}0003$	$1{,}4\pm 0{,}1$	$0{,}32\pm0{,}03$
724	Erbsen	Boden	$0,040 \pm 0,003$	$0{,}0091\pm 0{,}0007$	$1{,}4\pm 0{,}1$	$0{,}32\pm0{,}03$
727	Roggen	Boden	$0,013 \pm 0,001$	$0{,}011 \pm 0{,}001$	$0{,}50\pm0{,}05$	$0{,}43\pm0{,}04$
728	Roggen	Boden	$0,0045 \pm 0,0004$	$0{,}0039 \pm 0{,}0004$	$0{,}56\pm0{,}05$	$0{,}48\pm0{,}04$
731	Hafer	Boden	$0,0059 \pm 0,0004$	$0{,}0052\pm 0{,}0004$	$0{,}63\pm0{,}05$	$0{,}55\pm0{,}04$
732	Hafer	Boden	$0,043 \pm 0,003$	$0{,}038 \pm 0{,}003$	$0{,}67\pm0{,}07$	$0{,}58\pm0{,}06$
733	Hafer	Boden	$0,015 \pm 0,001$	$0{,}013 \pm 0{,}001$	$0{,}53\pm0{,}05$	$0{,}46\pm0{,}04$
737	Mais	Boden	$0,0044 \pm 0,0005$	$0{,}0038 \pm 0{,}0005$	$0{,}55\pm0{,}05$	$0{,}48\pm0{,}04$
738	Mais	Boden	$0,0031 \pm 0,0002$	$0{,}0027 \pm 0{,}0002$	$0{,}56\pm0{,}05$	$0{,}49\pm0{,}04$
739	Mais	Boden	$0,0038 \pm 0,0005$	$0{,}0034 \pm 0{,}0004$	$0{,}49\pm0{,}04$	$0{,}42\pm0{,}04$
743	Weizen	Boden	$0,\!006\pm 0,\!001$	$0{,}005 \pm 0{,}001$	$0{,}42\pm0{,}04$	$0{,}37\pm0{,}03$
744	Weizen	Boden	$0,008 \pm 0,001$	$0{,}007\pm0{,}001$	$0{,}47\pm0{,}04$	$0{,}41\pm0{,}03$
745	Weizen	Boden	$0,009 \pm 0,001$	$0,007 \pm 0,001$	$0,\!54 \pm 0,\!04$	$0{,}47\pm0{,}04$

B.2 Abbildungen



Abbildung B.1: Kontaminierte Gebiete in der nördlichen Ukraine mit besonderer Kennzeichnung des Herkunftsortes (Christinowka) der Proben, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Die Karte ist [IAE91] entnommen und zeigt anhand der Farbcodierung die unfallbedingten ¹³⁷Cs-Kontaminationen an.

Die blauen Geraden in folgenden Abbildungen geben an, wo die Punkte jeweils bei idealer Übereinstimmung liegen müssten. Man beachte die logarithmische Skalierung bei einigen Graphen. Der Massenbezug (FM : Frischmasse, TM : Trockenmasse) ist gegebenenfalls in der Achsenbeschriftung enthalten.



Abbildung B.2: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Milchproben mit den ukrainischen. Die rote Gerade ist ein linearer Fit an den Datensatz.



Abbildung B.3: Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Messwerte von Bodenproben mit den ukrainischen.



Abbildung B.4: Vergleich der im Rahmen früherer Messungen am ZSR ermittelten Messwerte von Bodenproben (siehe Abschnitt 3.5.7) mit den ukrainischen.



Abbildung B.5: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Bodenproben mit den ukrainischen.



Abbildung B.6: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Fleischproben mit den ukrainischen. In dieser Abbildung sind nur Messwerte vergleichsweise geringer spezifischer Aktivität eingetragen.



Abbildung B.7: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Fleischproben mit den ukrainischen für vier Proben höherer Aktivität.



Abbildung B.8: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Fischproben mit den ukrainischen.



"x": ¹³⁷Cs in Beeren [Bq kg⁻¹], Messwerte Ukraine

Abbildung B.9: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Beerenproben mit den ukrainischen. Für die ukrainischen Messwerte ist der Massenbezug unbekannt.



Abbildung B.10: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von sechs Beerenproben mit den ukrainischen, wobei sowohl auf die Trocken- als auch auf die Frischmasse bezogene ZSR-Messwerte mit den ukrainischen verglichen werden.



Abbildung B.11: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Pilzproben mit den ukrainischen.



Abbildung B.12: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Grasproben mit den ukrainischen.



Abbildung B.13: Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messwerte von Heuproben mit den ukrainischen.



Abbildung B.14: QQ-Plot für den Datensatz: Kuhmilch, ¹³⁷Cs, TM.

Abbildung B.15: QQ-Plot für den Datensatz: Tierproben, ¹³⁷Cs, FM.



Abbildung B.16: QQ-Plot für den Datensatz: Tierproben, 40 K, FM.





Abbildung B.18: QQ-Plot für den Datensatz: Getreide, ⁴⁰K, TM.



Abbildung B.19: QQ-Plot für den Datensatz: Blattgemüse, 40 K, FM.



Abbildung B.20: QQ-Plot für den Datensatz: Beeren, ¹³⁷Cs, TM.

Abbildung B.21: QQ-Plot für den Datensatz: Pilze, ¹³⁷Cs, TM.



Abbildung B.22: QQ-Plot für den Datensatz: Pilze, ⁴⁰K, FM.



Abbildung B.23: QQ-Plot für den Datensatz: Boden unter Gras, ¹³⁷Cs, TM.



Abbildung B.24: QQ-Plot für den Datensatz: Alle Böden, $^{137}\mathrm{Cs},\,\mathrm{TM}.$



Abbildung B.25: QQ-Plot für den Datensatz: Alle Böden, ⁴⁰K, TM.



Abbildung B.26: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Boden-Getreide, $$^{137}\rm{Cs},\,\rm{TM}.$$



Abbildung B.27: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Boden-Gras, 40 K, TM.



Abbildung B.28: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Boden-Wurzelgemüse, $$^{137}\rm{Cs},\,\rm{FM}.$$



Abbildung B.29: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Blattgemüse-Getreide, $^{137}\mathrm{Cs},\,\mathrm{FM}.$



Abbildung B.30: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Boden-Beeren, 137 Cs, TM.



Abbildung B.31: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Boden-Beeren, ${}^{40}K$, FM.



Abbildung B.32: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Boden-Butterpilze, 137 Cs, TM.

Abbildung B.33: QQ-Plot für den Datensatz: Transfer Organische Auflage-Pilze, ¹³⁷Cs, TM.



Abbildung B.34: Verteilung der Effektiven Ingestionsdosis für Erwachsene (zu Tabelle 6.16) mit gefitteter Lognormalverteilung (durchgezogene Linie). Der Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 % ist rot markiert.



Abbildung B.35: Verteilung der Effektiven Ingestionsdosis für Erwachsene (zu Tabelle 6.18) mit gefitteter Lognormalverteilung (durchgezogene Linie). Der Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 % ist rot markiert.

C Abkürzungen und Formelzeichen

Bemerkung: Es sind nicht alle im Text verwendeten Formelzeichen hier angegeben. Einige werden zudem an verschiedenen Stellen mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Die Bedeutung kann jedoch stets dem Kontext entnommen werden.

A	u.a.: Massenzahl, Aktivität
\mathcal{A}	Spezifische Aktivität
AM	u.a.: Arithmetischer Mittelwert
AS	u.a.: Arithmetische Standardabweichung
AsM	Aschmasse
c	Lichtgeschwindigkeit
D	Energiedosis
ε	Efficiency (genauer: Photopeak-Efficiency)
E	Effektive Dosis
E_{γ}	Energie eines Gammaphotons
EW	Erwartungswert (u.a. bei angenommener Lognormalverteilung)
\mathbf{FM}	Frischmasse / Feuchtmasse
FWHM	Halbwertbreite
GM	Geometrischer Mittelwert
GS	Geometrische Standardabweichung
Η	Organdosis
HPGe	Reinstgermanium
κ	Wirkungsquerschnitt des Paarbildungseffekts
$k_{\rm eff}$	Effektiver Neutronenvermehrungsfaktor
k_s	Summationskorrektionsfaktor
M	Molgewicht
ME	Median
МО	Modus

C Abkürzungen und Formelzeichen

μ	u.a.: Linearer Schwächungskoeffizient
μ_m	Massenschwächungskoeffizient
N	u.a.: Zählereignisse in einem Photopeak, Anzahl an Proben
n	u.a.: Anzahl an Messwerten
N_A	Avogadro-Konstante
OA	Organische Auflage
ORM	Operative Reaktivitätsreserve
P5	Kleine Petrischale
P10	Große Petrischale
P95	95 %-Perzentil
p_{γ}	Photonen-Emissionswahrscheinlichkeit
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RBMK	Siedewasserreaktor hoher Leistung
ρ	u.a.: Reaktivität
hoSUAEU	u.a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine
$ ho$ SUAEU σ	u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts
ρ SUAEU σ T	u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor
ho SUAEU σ T τ	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts
$ ho$ SUAEU σ ${\cal T}$ $ au$ $T_{1/2}$	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit
ρ SUAEU σ T τ $T_{1/2}$ TM	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit Trockenmasse
ho SUAEU σ \mathcal{T} τ $T_{1/2}$ TM u	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit Trockenmasse Atomare Masseneinheit
ho SUAEU σ au au au au au au au	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit Trockenmasse Atomare Masseneinheit Verzehrsmenge
ρ SUAEU σ T τ $T_{1/2}$ TM u V VB	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit Trockenmasse Atomare Masseneinheit Verzehrsmenge Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95 %
ho SUAEU σ \mathcal{T} τ $T_{1/2}$ TM u V VB w_R	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit Trockenmasse Atomare Masseneinheit Verzehrsmenge Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95% Strahlungs-Wichtungsfaktor
ho SUAEU σ \mathcal{T} τ $T_{1/2}$ TM u V VB w_R w_T	 u. a.: Reaktivität State University of Agriculture and Ecology of Ukraine Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts Transferfaktor u. a.: Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts Halbwertzeit Trockenmasse Atomare Masseneinheit Verzehrsmenge Vertrauensbereich zu einem Vertrauensniveau von 95% Strahlungs-Wichtungsfaktor Gewebe-Wichtungsfaktor

Literaturverzeichnis

- [AVV] Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Stand 11.08.2003.
- [Bel98] BELTZ, D.: Spaltprodukte in der Umgebung von Tschernobyl und die Strahlenexposition der dortigen Bevölkerung. Diplomarbeit, Universität Hannover, 1998.
- [Beu99] BEUGE, P. ET AL.: *Die Schwermetallsituation im Muldesystem*. Schlussbericht zu den BMBF-Fördervorhaben 02WT9113 und 02WT9114, 1999.
- [BfS01] Jahresbericht 2001 des BfS. Bundesamt für Strahlenschutz, 2001.
- [BGB] Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau). Empfehlung der Strahlenschutzkommission vom 02./03.07.1998, durch BMU und BfS überarbeitete Fassung, Stand 30.07.1999.
- [Bot00] BOTSCH, W.: Untersuchungen zur Strahlenexposition von Einwohnern kontaminierter Ortschaften der nördlichen Ukraine. Doktorarbeit, Universität Hannover, 2000.
- [BS95] BROWN, J. und SIMMONDS, J.R.: FARMLAND A Dynamic Model for the Transfer of Radionuclides through Terrestrial Foodchains. NRPB-R273, National Radiological Protection Board, 1995.
- [Car01] CARINI, F.: Radionuclide transfer from soil to fruit. Journal of Environmental Radioactivity, 52:237–279, 2001.
- [COD02] CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants. Committee on Data for Science and Technology, Internet-Adresse: http://physics.nist.gov/cuu/Constants/, 2002.
- [CR03] CAMPBELL, N.A. und REECE, J.B.: Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin, 6. Auflage, 2003.
- [DeC98] DECORT, M. ET AL.: Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
- [Dem96] DEMTRÖDER, W.: Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 1996.
- [Dem98] DEMTRÖDER, W.: Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 1998.

- [DH88] DEBERTIN, K. und HELMER, R.G.: Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1988.
- [DIN96] DIN 1319-3: Grundlagen der Meßtechnik Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit. Deutsches Institut für Normung e.V., 1996.
- [DIN03] DIN 25482-1 (5. VORLAGE): Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen - Teil 1: Spezielle Anwendungen. Deutsches Institut für Normung e.V., FB Kerntechnik, 2003.
- [Dra04] DRAGON, N.: Geometrie der Relativitätstheorie. Internet-Adresse: http://www.itp.uni-hannover.de/~dragon/stonehenge/relativ.pdf, 2004.
- [DS90] DEBERTIN, K. und SCHÖTZIG, U.: Bedeutung von Summationskorrektionen bei der Gammastrahlen-Spektrometrie mit Germaniumdetektoren. PTB-Bericht Ra-24, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1990.
- [DTI03] The G8 Global Partnership Progress report on the UK's programme to adress nuclear, chemical and biological legacies in the Former Soviet Union - First Annual Report 2003. Department of Trade and Industry (United Kingdom), November 2003.
- [EK02] EHLKEN, S. und KIRCHNER, G.: 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, 2002.
- [Eur96] Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 159, 1996.
- [Fah04] FAHRMEIR, L. ET AL.: Statistik Der Weg zur Datenanalyse. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 5. Auflage, 2004.
- [Fau88] Faustzahlen f
 ür Landwirtschaft und Gartenbau. Ruhr-Stickstoff Aktiengesellschaft Bochum, 11. Auflage, 1988.
- [Gon96] GONZÁLEZ, A.J.: The Radiological Consequences of Chernobyl: A Saga Towards the Truth? In: BAYER, A. ET AL. (Herausgeber): Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz - Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, Seiten 23–49. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena, März 1996.
- [Han03] HANDL, J. ET AL.: Evaluation of Radioactive Exposure from Cs-137 in contaminated areas of Northern Ukraine. Health Physics, 84(4):502–517, April 2003.
- [Har04] HARB, S.R.M.: On the human radiation exposure as derived from the analysis of natural and man-made radionuclides in soils. Doktorarbeit, Universität Hannover, 2004.
- [Hei92] HEINRICH, G.: Uptake and transfer factors of ¹³⁷Cs by mushrooms. Radiation and Environmental Biophysics, 31:39–49, 1992.

[Hoh04a] HOHMANN, E. - Private Mitteilung, 2004.

- [Hoh04b] HOHMANN, E.: Radiologische Modellierung der Ablagerung auf Bergehalden. Diplomarbeit, Universität Hannover, 2004.
- [IAE91] Surface Contamination Maps. International Atomic Energy Agency, The International Chernobyl Project, 1991.
- [Iye04] IYENGAR, G.V. ET AL.: Dietary intakes of seven elements of importance in radiological protection by asian population: comparison with ICRP data. Health Physics, 86(6):557–564, 2004.
- [Jäc87] JÄCKEL, B. ET AL.: On the photopeak efficiency of germanium gamma-ray detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A261:543–548, 1987.
- [Kal03] KALINOWSKI, U.: Transfer von Radionukliden in die Nahrungskette in der nördlichen Ukraine. Staatsexamensarbeit, Universität Hannover, 2003.
- [Kem96] KEMSKI, J. ET AL.: Die terrestrische Strahlung durch natürlich radioaktive Elemente in Gesteinen und Böden. In: SIEHL, A. (Herausgeber): Umweltradioaktivität, Seiten 69–96. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1996.
- [Kno99] KNOLL, G.F.: Radiation Detection and Measurement. John Wiley and Sons, New York, 3. Auflage, 1999.
- [Krü96] KRÜGER, F.W. ET AL.: Der Ablauf des Reaktorunfalls Tschernobyl 4 und die weiträumige Verfrachtung des freigesetzten Materials: Neuere Erkenntnisse und ihre Bewertung. In: BAYER, A. ET AL. (Herausgeber): Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz - Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, Seiten 3–22. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena, März 1996.
- [Kra87] KRANE, K.S.: Introductory Nuclear Physics. John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [Kri02] KRIEGER, H.: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz Band 1 Grundlagen. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 3. Auflage, 2002.
- [Law91] Law of Ukraine No. 796-XII. On the status and social protection of citizens who suffered as a consequence of the Chernobyl catastrophe. VVR 191, No. 16 p. 220, Februar 1991.
- [Law01] Fifteen Years of the Chernobyl Disaster: the Experience of Overcoming: the National Report of Ukraine. Chernobyl Radioecological Center of the Ministry of Emergencies of Ukraine, 2001.
- [Lim01] LIMPERT, E. ET AL.: Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. BioScience, 51(5):341–352, 2001.
- [LP96] LIKHTAREV, I.A. und PARETZKE, H.G.: Exposure of Different Population Groups of Ukraine after the Chernobyl Accident and Main Health-Risk Assessments. In: BAYER, A. ET AL. (Herausgeber): Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine

Bilanz - Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, Seiten 65–85. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena, März 1996.

- [Mes00] Messanleitung für die Uberwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung radioaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena, 2000.
- [Mew04] MEWIS, A.: Strontium-90 in der Umwelt: Migrationsverhalten im Boden, Transfer in die Nahrungskette und Strahlenexposition in der nördlichen Ukraine. Doktorarbeit, Universität Hannover, 2004.
- [Mic95] MICHAELIS, H. ET AL.: Handbuch Kernenergie Kompendium der Energiewirtschaft und Energiepolitik. VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 4. Auflage, 1995.
- [Mic01] MICHEL, R.: 15 Jahre nach dem Unfall von Tschernobyl: Ein Überblick über die radiologischen und radioökologischen Folgen. Seminar der TÜV Akademie, 28./29. Juni 2001, München, 2001.
- [Min01] 15 Jahre nach der Katastrophe Tschernobyl: Gefahr vorbei? Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein, April 2001.
- [MK99] MICHEL, R. und KIRCHHOFF, K.: Nachweis-, Erkennungs- und Vertrauensgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen. Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz, Fachverband für Strahlenschutz e.V., 1999.
- [MP93] MUELLER, H. und PROEHL, G.: Ecosys-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. Health Physics, 64(3):232–252, 1993.
- [NAG02] g01 Simple Calculations on Statistical Data Shapiro and Wilk's W test for Normality (g01ddc). NAG C Library, The Numerical Algorithms Group Ltd, 2002.
- [Pfe98] PFENNIG, G. ET AL.: Karlsruher Nuklidkarte. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH - Technik und Umwelt, 6. Auflage, 1998.
- [Rom04a] ROMANTSCHUK, L.D. Mitteilung, Juli 2004.
- [Rom04b] ROMANTSCHUK, L.D. Mitteilung, Januar 2004.
- [Roy82] ROYSTON, J.P.: An extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to large samples. Applied Statistics, 31(2):115–124, 1982.
- [Sac04] SACHS, L.: Angewandte Statistik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 11. Auflage, 2004.
- [Sch98] SCHKADE, U.-K. ET AL.: Gammaspektrometrische Bestimmung der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide in Umweltproben - 5. Vergleichsanalyse "Boden 1998". BfS-Bericht ST 2-27/1998, Bundesamt für Strahlenschutz, 1998.
- [Sch02] SCHEFFER, F. ET AL.: Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin, 15. Auflage, 2002.
- [SE88] SHEPPARD, S.C. und EVENDEN, W.G.: The Assumption of Linearity in Soil and Plant Concentration Ratios: An Experimental Evaluation. Journal of Environmental Radioactivity, 7:221–247, 1988.

- [Sha01] SHAW, G.: Radioecology how did we get here and what do we do now? Journal of Environmental Radioactivity, 54:305–309, 2001.
- [Shi97] SHIRAISHI, K. ET AL.: Daily intakes of ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²³²Th, and ²³⁸U in ukrainian adult males. Health Physics, 73(5):814–819, 1997.
- [Sie96] SIEHL, A.: Grundlagen und geowissenschaftliche Aspekte der Umweltradioaktivität. In: SIEHL, A. (Herausgeber): Umweltradioaktivität, Seiten 1–30. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1996.
- [Sim02] SIMON, S.L. ET AL.: Uptake of ⁴⁰K and ¹³⁷Cs in native plants of the Marshall Islands. Journal of Environmental Radioactivity, 59:223–243, 2002.
- [SS98] SCHÖTZIG, U. und SCHRADER, H.: Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden. PTB-Bericht Ra-16/5, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1998.
- [Ste02] STEINER, M. ET AL.: The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems. Journal of Environmental Radioactivity, 58:217–241, 2002.
- [Str01] Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714), Artikel 1 "Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), 2001.
- [TH02] TSUKADA, H. und HASEGAWA, H.: Soil-to-plant transfer of ¹³⁷Cs and other essential and trace elements in cabbage plants. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 252(2):219–224, 2002.
- [Tra04] TRAVNIKOVA, I.G. ET AL.: Lake fish as the main contributor of internal dose to lakeshore residents in the Chernobyl contaminated area. Journal of Environmental Radioactivity, 77:63–75, 2004.
- [TRS94] Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No. 364, 1994.
- [UNS88] UNSCEAR: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 1988.
- [UNS00] UNSCEAR: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 2000 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 2000.
- [Vah04a] VAHLBRUCH, J.-W. Private Mitteilung, 2004.
- [Vah04b] VAHLBRUCH, J.-W.: Über den Transfer von natürlichen Radionukliden in terrestrischen Ökosystemen und die realistische Modellierung der natürlichen Strahlenexposition in Norddeutschland. Doktorarbeit, Universität Hannover, 2004.
- [Vol94] VOLKMER, M.: Basiswissen zum Thema Kernenergie Die wichtigsten Erkenntnisse aus Kernphysik und Kerntechnik. Informationskreis Kernenergie, Bonn, 1994.

- [Wan04] WANKE, C.: Schadstoffbelastung im Mulde- und Elbe-Einzugsgebiet nach dem Augusthochwasser 2002 - Verlagerungen natürlicher Radionuklide. Diplomarbeit, Universität Hannover, 2004.
- [Wir96] WIRTH, E.: Die Kontamination der Umwelt mit künstlichen Radionukliden und die daraus resultierende Strahlenexposition des Menschen. In: SIEHL, A. (Herausgeber): Umweltradioaktivität, Seiten 345–365. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1996.

Danksagung

Viele Personen haben mir während der Bearbeitung dieser Diplomarbeit in den unterschiedlichsten Situationen geholfen. Ihnen allen sei gedankt, einige sind jedoch hervorzuheben.

Herrn Prof. Dr. Rolf Michel danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit am ZSR anzufertigen und die im Verlauf der Arbeit geleistete, stets freundliche und geduldige Unterstützung.

Für die freundliche Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Privatdozent Dr. Ingo Leya.

Desweiteren bin ich der ehemaligen wissenschaftlichen Hilfskraft des ZSR, Jinping Lu, zu großem Dank für ihre tatkräftige Hilfe verpflichtet.

Herrn Dr. Dieter Jakob danke ich für den Arbeitsplatz in seinem Büro und natürlich die zahllosen Gespräche über die verschiedensten Themen.

Artur Meleshyn und Eike Hohmann danke ich für die Unterhaltungen, die es immer wieder geschafft haben, den manchmal auch grauen Arbeitsalltag aufzuhellen.

Für die Unterstützung gerade in der Anfangszeit der Arbeit bin ich Dr. Jan Vahlbruch und Dr. Arne Mewis zu Dank verpflichtet.

Für die sorgfältige Durchsicht dieser Arbeit und viele nützliche Korrekturhinweise danke ich Prof. Dr. Michel, Dr. Dieter Jakob, Dr. Jan Vahlbruch und ganz besonders Dr. Claus Bunnenberg, der sich dazu trotz eigener Misslichkeiten bereit erklärte.

Für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre am ZSR und die Hilfe bei diversen Problemen, die ich auch bei scheinbaren Kleinigkeiten in jedem Fall zu schätzen wußte, danke ich neben den bereits erwähnten Personen Sven Hippler, Dr. Michael Täschner, Dr. Beate Riebe, Rüdiger Sachse, Karl-Heinz Iwannek, Monika Gorny, Julia Behnsen, Gabriele Erb-Bunnenberg, Kevin Klipsch, Carsten Wanke, Stefan Ritzel, Hans-Georg Hannibal, Michael Senft, Ralf Groffmann und allen weiteren Mitarbeitern des ZSR.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für den steten Rückhalt auch in den stressigsten Zeiten danken.

Danksagung
Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbst angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfmittel und Quellen verwendet habe.

Hannover, den 22.10.2004