

KfK 4140
November 1986

Der Reaktorunfall von Tschernobyl

Die Strahlenexposition im Raum Karlsruhe

H. Schüttelkopf, A. Wicke
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Hauptabteilung Sicherheit

KfK 4140

Der Reaktorunfall von Tschernobyl
- Die Strahlenexposition im Raum Karlsruhe -

H. Schüttelkopf, A. Wicke

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Im Raum Karlsruhe wird für das Jahr Mai 1986/Mai 1987 für Erwachsene eine Strahlenexposition von 60 μSv (6 mrem), für ein einjähriges Kind von 118 μSv (11,8 mrem) erwartet. Verursacht werden diese Effektivdosen durch die Einatmung der Radionuklide, die beim Reaktorunfall in Tschernobyl freigesetzt wurden, durch die γ -Dosis von am Boden abgelagerten Radionukliden und durch die Ingestion von kontaminierten Nahrungsmitteln. Die natürliche Strahlenexposition, verursacht durch die Aufnahme von natürlichen Radionukliden mit der Nahrung und der Atmungsluft, die terrestrische und die kosmische Strahlung beträgt ungefähr 2200 $\mu\text{Sv/a}$ (220 mrem/a). Im ersten Jahr nach dem Reaktorunfall wird die zusätzliche Strahlenexposition daher ca. 5 % der natürlichen Jahresexposition betragen. In den Folgejahren wird die Strahlenexposition durch Radionuklide aus Tschernobyl vernachlässigbar klein sein.

The Reactor Accident of Chernobyl - Exposure Dose of the Population in the Karlsruhe Region -

Abstract

In the Karlsruhe region an effective dose equivalent is expected to be 60 μSv (6 mrem) for adults and 118 μSv (11,8 mrem) for a child, one year old, for the time between May 86 and May 87. These doses are caused by inhalation of radionuclides released during the reactor accident of Chernobyl, by the γ -radiation of deposited radionuclides and by the ingestion of contaminated food. The dose caused by as the uptake of natural radioactivity by food and inhaled air, the terrestrial and cosmic radiation achieves about 2200 $\mu\text{Sv/a}$ (220 mrem/a). During the first year after the reactor accident the additional dose will be about 5% of the natural annual exposure. During the following years the dose caused by radionuclides from Chernobyl will be negligible low.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Das Ausmaß der Umgebungskontamination im Raum Karlsruhe	1
2	Die exexterne Strahlenexposition	4
2.1	Meßwerte	4
2.2	Voraussetzungen für die Berechnung der externen Strahlenexposition	4
2.3	Ergebnisse für die externe Strahlenexposition 86/87	5
2.4	Die externe Strahlenexposition in den Folgejahren	5
3	Die Strahlenexposition durch Inhalation	9
3.1	Meßwerte	9
3.2	Voraussetzungen für die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation	9
3.3	Ergebnisse für die Strahlenexposition durch Inhalation für 86/87	9
3.4	Die Strahlenexposition durch Inhalation in den Folgejahren	13
4	Die Strahlenexposition durch Ingestion	14
4.1	Meßwerte	14
4.2	Voraussetzungen für die Berechnung des Strahlenexposition durch Ingestion	15
4.3	Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion für 86/87	16
4.4	Die Strahlenexposition durch Ingestion in den Folgejahren	17
5	Die Gesamtexposition	19
6	Literatur	21

1 Das Ausmaß der Umgebungskontamination im Raum Karlsruhe [1]

Der normale Untergrund der γ -Ortsdosisleistung beträgt 90 bis 100 nSv/h am Referenzpunkt. Ein erster Anstieg wurde am 1. Mai 1986 beobachtet; das Maximum wurde am 7. Mai 1986 mit 210 nSv/h erreicht. Zur Zeit liegt der Wert bei 110 nSv/h. Dieser Wert ist höher als der Untergrund und verändert sich kaum mehr.

Die maximalen β -Aktivitätskonzentrationen in der bodennahen Luft betragen 60 bis 100 Bq/m³. Am 4. und 7. Mai 1986 nahm die β -Aktivitätskonzentrationen jeweils um mehr als eine Größenordnung ab. Es war keine Erhöhung der spezifischen α -Aktivität meßbar. Als Maximalwerte der Aktivitätskonzentrationen wichtiger γ -Strahler in der bodennahen Umgebungsluft wurden gemessen 29 Bq I-131/m³, 26 Bq Te-132/m³, 5,8 Bq Cs-137/m³, 3,3 Bq Cs-134/m³, 6,5 Bq Ru-103/m³ und 5,4 Bq Te-129m/m³. Die Aktinidenkonzentrationen betragen 90 bis 290 μ Bq Cm-242/m³ und 10 bis 30 μ Bq Pu-239 + 240/m³. Die Sr-89 + 90-Aktivität lag um den Faktor 10 unter den Werten von Cs-137; das Verhältnis von Sr-89/Sr-90 lag bei ca. 10.

Da die Ablagerung radioaktiver Stoffe am 4. und 5. Mai 1986 im wesentlichen beendet war, werden die Angaben zu Futtermitteln, alle auf diesen Zeitraum bezogen. In Gras von Neuthard wurden 4 000 Bq I-131/kg, 1 000 Bq Te-132/kg und 500 Bq Cs-137/kg gemessen. In Spöck lagen die Werte bei 800 Bq I-131/kg, 200 Bq Te-132/kg, 170 Bq Cs-137/kg und 200 Bq Ru-103/kg. Die Unterschiede in den Aktivitätskonzentrationen in Abhängigkeit von der Art des Futtermittels waren im allgemeinen vernachlässigbar klein. Als mittlere Aktivitätskonzentrationen für die Grasproben in der Umgebung wurden folgende Werte festgestellt. 1 200 Bq I-131/kg, 400 Bq Te-132/kg und 180 Bq Cs-137/kg. In Südbaden wurden Aktivitätskonzentrationen beobachtet, die teilweise wesentlich höher waren als die hier genannten.

Als Beispiel für ausschließliche Grünfütterung wurden in der Milch vom Bauern H., Spöck, Maximalwerte von 60 Bq I-131/l, 1 Bq Te-132/l und 30 Bq Cs-137/l gemessen. Das Maximum der I-131-Konzentration war praktisch gleichzeitig mit dem Ende der Futtermittelkontamination erreicht; das Maximum der Cs-137-Konzentration wurde am 15. Mai 1986 erreicht. Die maximalen I-131-Konzentrationen in Molkereimilch lagen zwischen 30 und 50 Bq/l und die von Cs-137 zwischen 10 und 20 Bq/l. Das Iodmaximum wurde am 4. und 5. Mai 1986

erreicht, während das Cäsiummaximum in Karlsruhe am 18. Mai 1986, in Mannheim und Pforzheim am 1. Juni 1986 erreicht wurde. Eine Rückrechnung der verschiedenen I-131-Konzentrationen in den Milchproben aus der Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe bestätigt im wesentlichen, daß 60 bis 70 Bq I-131/l ein sinnvoller Maximalwert nach der Kontamination durch die Wolke von Tschernobyl war. Die Sr-89 + 90-Aktivitätskonzentrationen in Milch waren unter 1 Bq/l.

Salat, Spinat, Kräuter, anderes Gemüse, Obst, Beeren und Pilze gelangten zur Untersuchung. Die Meßwerte für die Radioaktivitätskonzentrationen schwankten in weiten Grenzen. Als sinnvolle Mittelwerte können für den Bezugszeitraum folgende Daten angegeben werden:

Salat: 200 Bq I-131/kg und 50 Bq Cs-137/kg

Spinat: 1 500 Bq I-131/kg und 140 Bq Cs-137/kg

Die I-131-Konzentrationen bei Petersilie liegen zwischen 1 500 und 2 500 Bq I-131/kg und bei ca. 220 Bq Cs-137/kg. Die Aktivitätskonzentrationen in Schnittlauch sind wesentlich niedriger. Die Kontamination des restlichen untersuchten Gemüses ist vernachlässigbar niedrig. Ebenso wurden für Beeren und Obst als Mittelwert für Cs-137 25 Bq/kg gefunden.

Die Pilze, die im Hardtwald gesammelt wurden, enthielten bis Oktober 1986 im Mittel 60 Bq Cs-137/kg. Wesentlich höhere Werte wurden allerdings im Südschwarzwald mit bis zu 134 Bq Cs-137/kg gemessen. Für alle pflanzlichen Nahrungsmittel gilt, daß die Streuung um die Mittelwerte sehr hoch ist.

Im Rindfleisch wurde ein Mittelwert von 13 Bq Cs-137/kg gemessen. Der Maximalwert betrug 1 010 Bq Cs-137/kg. Da sehr viele Proben unter der erreichten Nachweisgrenze lagen, dürfte aber der angegebene Mittelwert eher repräsentativ für die Versorgung der Bevölkerung sein. Der mittlere Wert für Schaffleisch lag bei 490 Bq Cs-137/kg, Maximalwerte wurden gemessen mit 65 600 Bq I-131/kg und 2 700 Bq Cs-137/kg. Der hohe I-131-Wert dürfte allerdings bedeuten, daß hier eine Schilddrüse eines Schafes miterfaßt wurde. Bei Wildfleisch wurde im Mittel 160 Bq Cs-137/kg gemessen und der Maximalwert betrug 3 700 Bq Cs-137/kg.

Die mittleren Aktivitätsablagerungen am Boden in der Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe verursacht durch die Aktivitätsfreisetzung beim Reaktorunfall in Tschernobyl betragen 5 200 Bq I-131/m², 760 Bq Cs-134/m², 1 520 Bq Cs-137/m² und 3 000 Bq Ru-103/m². Der Mittelwert der Cs-137-Aktivität, die pro Quadratmeter abgelagert wurde und durch Multiplikation mit dem Faktor 2 aus der Cs-134-Ablagerung errechnet wurde, stimmt für Cs-137 befriedigend mit der Ablagerung, die durch die Niederschlagsanalysen bestimmt wurde, überein. Die durch trockene und nasse Ablagerung erfaßte I-131-Aktivität ist aber etwa doppelt so hoch wie der Mittelwert der I-131-Ablagerung im Boden.

Die große Masse der Meßwerte, die mit Trink- und Oberflächenwasser erhalten wurde, lag wie erwartet an oder unter der Nachweisgrenze. Der höchste Meßwert betrug 6,3 Bq I-131/l und wurde in einem Oberflächenwasser gemessen.

Die höchsten Konzentrationen im Klärschlamm betragen, bezogen auf das Trockengewicht, 117 800 Bq Ru-103/kg, 41 900 Bq I-131/kg, 36 400 Bq Cs-134/kg und 66 700 Bq Cs-137/kg (Ravensburg, 1. Mai bis 20. Mai 1986).

2 Die externe Strahlenexposition

2.1 Meßwerte

Die Ortsdosisleistung der γ -Strahlung wird mit einem energiekompensierten Proportionalzählrohr Typ LB 6005, Firma Berthold, Wildbad, gemessen. Der normale Untergrund beträgt 90 bis 100 nSv/h. Der Maximalwert von 210 nSv/h wurde am 7. Mai 1986 erreicht; am 28. oder 29. Mai 1986 war die Ortsdosisleistung in der Meßhütte West des Kernforschungszentrums Karlsruhe wieder auf einen Wert von 110 nSv/h gesunken. Dieser Meßwert liegt etwa um 15 % über dem normalen Untergrund. Trotz Austausches des kontaminierten Zählrohres ging die Ortsdosisleistung an der Meßhütte West nicht mehr auf den normalen Untergrund zurück. Die Ursache für diese erhöhte Ortsdosisleistung ist die Kontamination der Blätter und Nadeln des umliegenden Waldes. Dieser Wert dürfte mit dem Laub- und Nadelfall zuerst zu einer leichten Erhöhung der bodennahen γ -Dosisleistung führen und später nach dem Auswaschen der dosisrelevanten Radionuklide Cs-137 und Cs-134 in den Boden vernachlässigbar klein werden.

2.2 Voraussetzungen für die Berechnung der externen Strahlenexposition

Bei den folgenden Strahlenexpositionsberechnungen für Menschen werden ein einjähriges Kind, ein erwachsener Mann und ein "Extremfall" betrachtet. Für das Kind und den Erwachsenen wird angenommen, daß sie täglich vier Stunden im Freien der gemessenen Ortsdosisleistung ausgesetzt waren. Die restliche Zeit verbringen sie in einem Gebäude, das die γ -Strahlung vollständig abschirmt. Für beide wird angenommen, daß der Anteil der Zeit, den sie im Wald verbringen, vernachlässigbar klein ist. Dies bedeutet, daß für diese beiden Fälle nur die Strahlenexposition der ersten ca. 28 Tage von Bedeutung ist. Für den "Extremfall" wird angenommen, daß er nicht nur ganztägig sich im Freien aufhält, sondern daß er die gesamte Zeit im Wald verbringt. In allen Fällen wird die Strahlenexposition im ersten Jahr vom 1. Mai 1986 bis zum 1. Mai 1987 berechnet.

2.3 Ergebnisse für die externe Strahlenexposition 86/87

Die externe Strahlenexposition geht zurück auf die γ -Strahlung von am Boden abgelagerter Radioaktivität und die von Radionukliden, die in der bodennahen Atmosphäre enthalten sind. Letztere beträgt weniger als 1 % der gesamten externen Strahlenexposition. Die für die externe Strahlenexposition wichtigsten am Boden abgelagerten Radionuklide waren I-131, Te-132, Cs-137, Cs-134, Ba-140/La-140, Zr-95/Nb-95 und einige andere γ -Strahler. In Abb. 1 ist die Ortsdosisleistung in $\mu\text{Sv/d}$ in Abhängigkeit von der Zeit für die Monate Mai und Juni 1986 dargestellt. In Abb. 2 wird die externe Strahlenexposition in der Umgebung des KfK während des ganztägigen Aufenthalts im Freien durch die natürliche Strahlenexposition, durch die natürliche plus die durch den Reaktorunfall von Tschernobyl verursachte Strahlenexposition sowie die natürliche plus die durch den Reaktorunfall von Tschernobyl verursachte Strahlenexposition und die zusätzliche Annahme des ganztägigen Aufenthalts im Wald dargestellt.

Mit den in Pkt. 2.2 dargestellten Voraussetzungen erhält man folgende externe Strahlenexpositionen für den Zeitraum Mai 1986 bis Mai 1987:

Einjähriges Kind, vier Stunden Aufenthalt im Freien	5 μSv
Erwachsener, vier Stunden Aufenthalt im Freien	5 μSv
"Extremfall", ganztägiger Aufenthalt im Wald	166 μSv

2.4 Die externe Strahlenexposition in den Folgejahren

In den Jahren nach 86/87 werden Cs-137 und im untergeordneten Maße Cs-134 für die externe Strahlenexposition der Bevölkerung im wesentlichen verantwortlich sein. Zur Berechnung der externen Strahlenexposition für die auf 86/87 folgenden 49 Jahre wurden die Dosisfaktoren für γ -Bodenstrahlung aus Tab. 1 benutzt. Außerdem wurde der Berechnung zugrundegelegt die Gesamtablagerung im Raum des Kernforschungszentrums Karlsruhe von 1520 Bq Cs-137/ m^2 und 760 Bq Cs-134/ m^2 . Es wurde angenommen, daß die Strahlung ausschließlich mit der physikalischen Halbwertszeit von 30,17 a für Cs-137 und 2,06 a für Cs-134 abnimmt. Vernachlässigt wurde die wesentliche Bedeutung der Absorption der γ -Strahlung durch den Boden nach dem Eindringen der Radionuklide in tiefere Schichten der Erde.

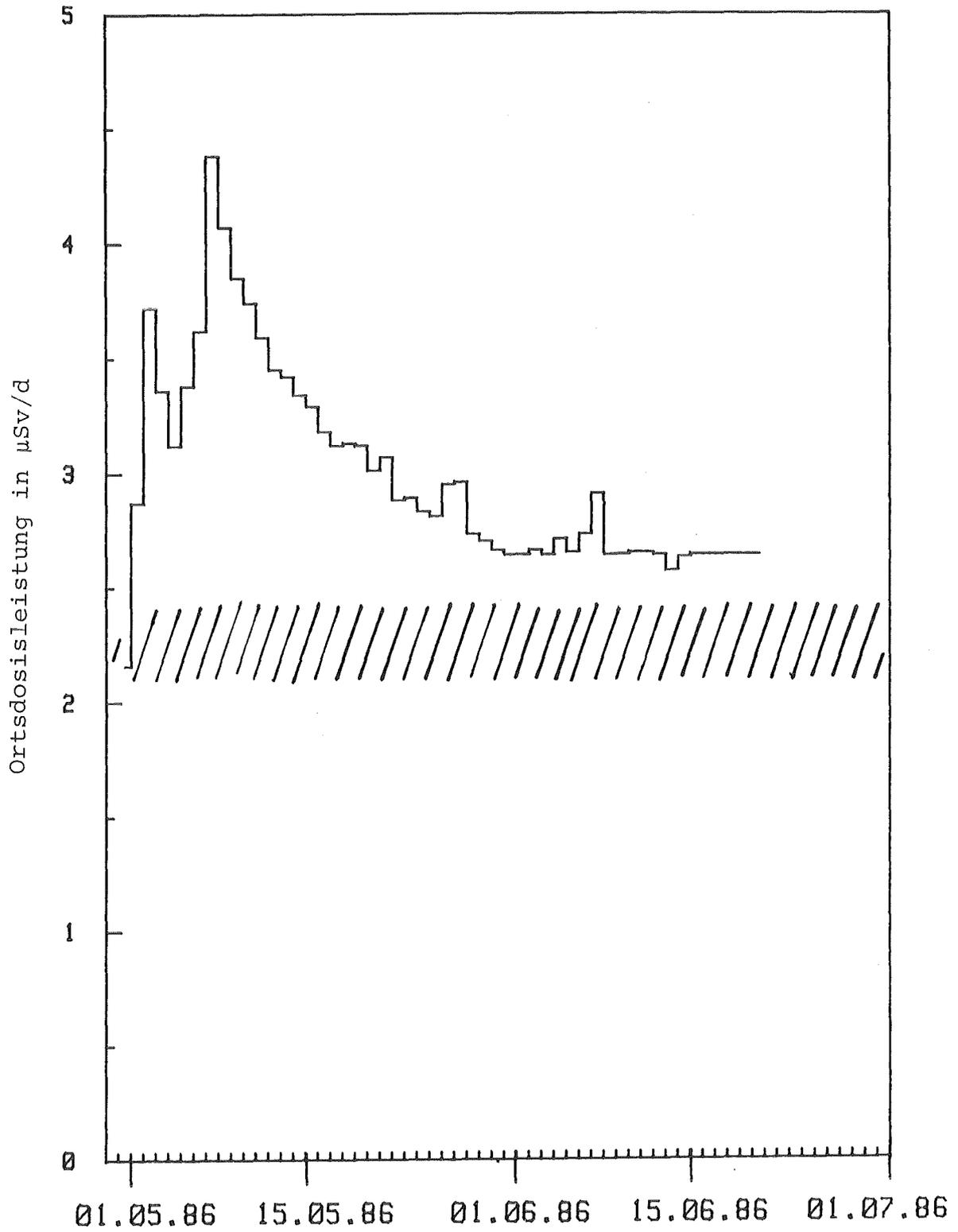


Abb. 1: Maximale Äquivalentdosisleistung bei der Meßhütte West im Kernforschungszentrum Karlsruhe.
/// = natürlicher Untergrund der Ortsdosisleistung

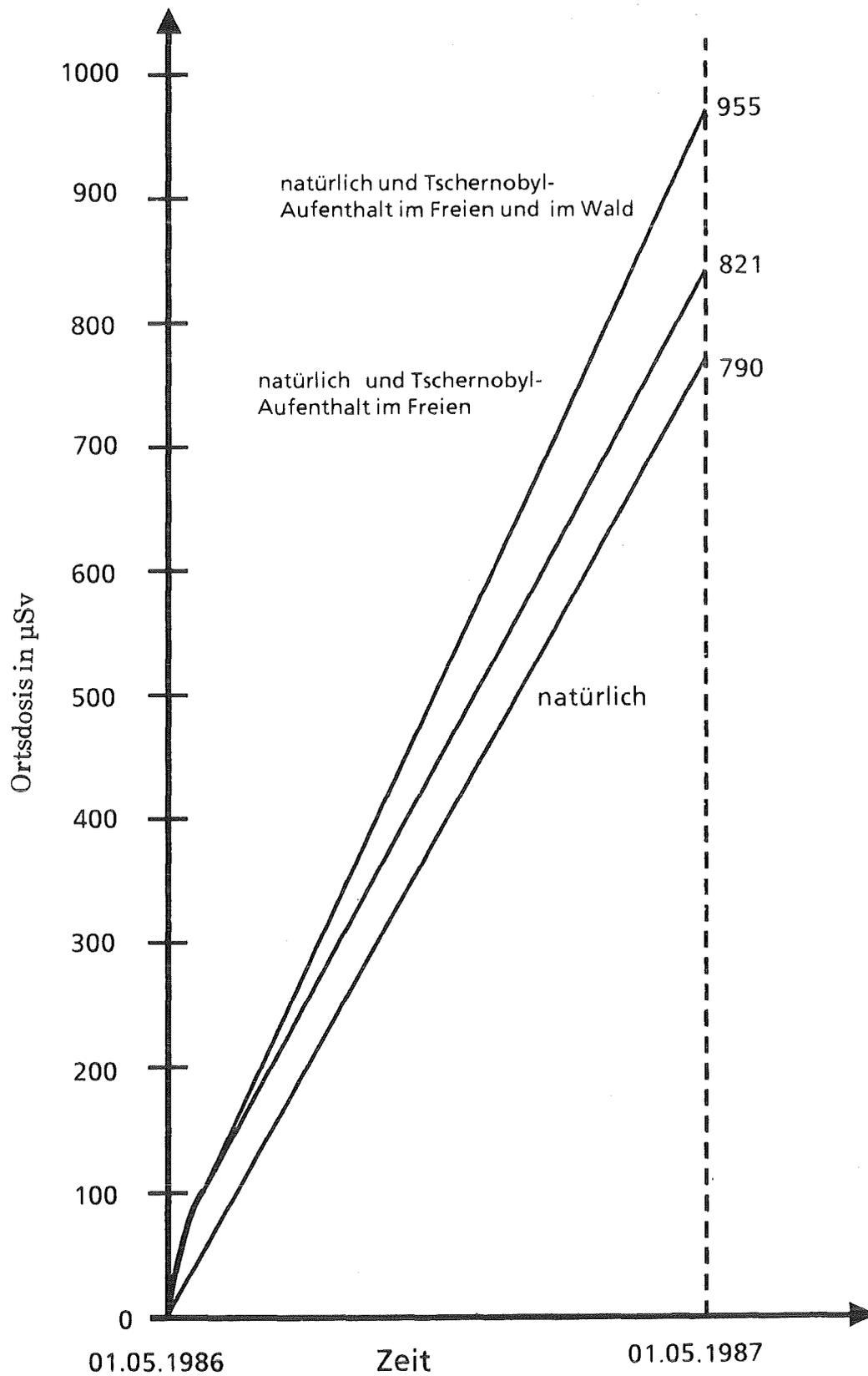


Abb. 2: Ortsdosis in der Umgebung des KfK

Die mittlere externe Strahlenexposition durch die γ -Bodenstrahlung in den folgenden 49 Jahren beträgt $12 \mu\text{Sv/a}$. Es gilt daher für die 86/87 folgenden 49 Jahre unter Berücksichtigung des Aufenthaltes im Freien:

Einjähriges Kind, vier Stunden Aufenthalt im Freien	$2 \mu\text{Sv/a}$
Erwachsener, vier Stunden Aufenthalt im Freien	$2 \mu\text{Sv/a}$
"Extremfall", ganztägiger Aufenthalt im Freien	$12 \mu\text{Sv/a}$

Die wirklichen Dosen, die die Umgebungsbevölkerung erhält, dürften aber wegen der großen Bedeutung der Absorption von γ -Strahlung im Boden vernachlässigbar klein sein.

Tab. 1: Dosisfaktoren für γ -Bodenstrahlung [2]

Radionuklid	Dosisfaktor Sv/h pro Bq/m^2
Sr-89	$2,3 \text{ E-}16$
Sr-90	-
Nb-95	$2,1 \text{ E-}12$
Mo-99	$4,3 \text{ E-}13$
Tc-99m	$4,0 \text{ E-}13$
Ru-103	$1,4 \text{ E-}12$
Ru-106	-
Ag-110m	$7,6 \text{ E-}12$
Sb-125	$1,3 \text{ E-}12$
Te-129m	-
Te-132	$7,6 \text{ E-}13$
I-131	$1,2 \text{ E-}12$
Cs-134	$4,3 \text{ E-}12$
Cs-136	-
Cs-137	$1,4 \text{ E-}12$
Ba-140	$5,4 \text{ E-}13$
La-140	$6,1 \text{ E-}12$
Ce-141	$2,5 \text{ E-}13$
Ce-144	$6,8 \text{ E-}14$

3 Die Strahlenexposition durch Inhalation

3.1 Meßwerte

Als Meßwerte für die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation wurden die Konzentrationen von I-131, Te-132, Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106, Te-129m, Sr-89 und Sr-90 aus der bodennahen Luft um das Kernforschungszentrum Karlsruhe benutzt. Da nicht alle Ru-106-Konzentrationen gemessen wurden, wurde ein Teil von ihnen aus dem mittleren Ru-103/Ru-106-Verhältnis bestimmt. Die Sammelintervalle und die Konzentrationen sind in Tab. 2 angegeben; die Konzentrationsintegrale enthält Tab. 3.

3.2 Voraussetzungen für die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation

Für die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation (und später durch Ingestion) wurden die Dosisfaktoren des Bundesgesundheitsamt in Neuherberg für Effektivdosen benutzt. Die Dosisfaktoren sind getrennt nach Erwachsenen und Kleinkindern bis ein Jahr sowie nach Inhalation und Ingestion in Tab. 4 angegeben.

Als Atemraten wurden Werte benutzt, die in der ICRP 23 [4] angegeben werden. Für einjährige Kinder wird $3,8 \text{ m}^3/\text{d}$ und für Erwachsene $22,8 \text{ m}^3/\text{d}$ angesetzt. Für den "Extremfall" wurde ein besonders hoher Wert aus der ICRP 23, nämlich $31 \text{ m}^3/\text{d}$ benutzt. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, daß die Strahlenexposition durch Inhalation in Wohnräumen den gleichen Wert hat wie im Freien. Der Grund für diese Annahme ist das schöne Wetter, in dem für diese Strahlenexposition relevanten Zeitraum vom 1. bis 5. Mai 1986, die Tatsache, daß drei der genannten Tage Feiertage waren und daß daher nicht nur ein erhöhter Anteil der Zeit im Freien verbracht wurde, sondern auch Fenster und Balkontüren geöffnet waren.

3.3 Ergebnisse für die Strahlenexposition durch Inhalation für 86/87

Als wichtigste Nuklide für die Effektivdosis, verursacht durch Inhalation der Umgebungsluft, sind I-131, Ru-106, Te-132, Cs-137, Cs-134 und Te-129m anzusehen (s. Tab. 5). Für die Strahlenexposition durch Inhalation erhält man:

Tab. 2: Aerosol- und Iodkonzentrationen in der Luft in Bq/m³

Sammelintervall	I-131	Te-132	Cs-134	Cs-137	Ru-103	Ru-106	Te-129m	Sr-89	Sr-90
29.04 11:15 - 30.04 17:45	0,17	0,10	0,005	0,016	0,015	0,002	0,0	0,0	0,0
30.04 17:45 - 01.05 11:00	0,081	0,062	0,0063	0,012	0,012	0,002	0,0	0,0	0,0
01.05 11:00 - 01.05 17:00	20,0	18,0	1,9	3,60	2,8	0,5	2,5	0,36	0,04
01.05 17:00 - 02.05 10:10	23,0	26,0	3,30	5,80	6,5	1,17	5,1	0,238	0,051
02.05 10:10 - 02.05 15:35	29,0	21,0	2,9	5,20	6,1	1,1	5,4	0,0	0,0
02.05 15:35 - 03.05 08:20	10,0	7,80	1,0	2,5	2,8	0,5	1,4	0,077	0,012
03.05 08:20 - 03.05 16:00	9,30	5,60	0,64	1,5	1,3	0,23	0,82	0,06	0,012
03.05 16:00 - 04.05 08:30	5,4	2,1	0,28	0,56	0,91	0,164	0,48	0,033	0,004
04.05 08:30 - 04.05 15:55	1,4	0,65	0,037	0,069	0,15	0,027	0,11	0,0	0,0
04.05 15:55 - 05.05 08:35	4,4	0,77	0,086	0,16	0,33	0,06	0,26	0,0	0,0
05.05 08:35 - 05.05 15:40	2,6	0,44	0,08	0,13	0,28	0,05	0,0	0,0	0,0
05.05 15:40 - 06.05 08:30	2,7	0,39	0,049	0,095	0,21	0,038	0,0	0,0	0,0
06.05 08:30 - 06.05 15:50	2,8	0,34	0,051	0,11	0,25	0,045	0,0	0,0	0,0
06.05 15:50 - 07.05 08:30	1,4	0,19	0,032	0,077	0,18	0,032	0,0	0,0	0,0
07.05 08:30 - 07.05 15:55	0,36	0,0057	0,0	0,0	0,0048	0,0009	0,0	0,0	0,0
07.05 15:55 - 08.05 08:30	0,21	0,12	0,0019	0,0027	0,0024	0,0004	0,0	0,0	0,0
08.05 08:30 - 09.05 08:30	0,12	0,072	0,0013	0,002	0,0011	0,0002	0,0	0,0	0,0
09.05 08:30 - 10.05 09:30	0,078	0,0015	0,0021	0,0033	0,0023	0,0004	0,0	0,0	0,0
10.05 09:30 - 11.05 10:00	0,061	0,0	0,0	0,0017	0,0025	0,0005	0,0	0,0	0,0
11.05 10:00 - 12.05 09:45	0,055	0,0	0,0	0,00094	0,002	0,0004	0,0	0,0	0,0
12.05 09:45 - 14.05 09:30	0,085	0,00045	0,0	0,00082	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14.05 09:30 - 16.05 09:45	0,050	0,0	0,001	0,0023	0,0013	0,0002	0,0	0,0	0,0
16.05 09:45 - 20.05 10:10	0,016	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20.05 10:10 - 22.05 09:45	0,0015	0,0	0,0	0,0014	0,0017	0,0003	0,0	0,0	0,0

Tab. 3: Aerosol- und Iodkonzentrationen in der Luft. Konzentrationsintegrale in Bq/m³

Sammelperiode	I-131	Te-132	Cs-134	Cs-137	Ru-103	Ru-106	Te-129m	Sr-89	Sr-90
29.04 11:15 - 30.04 17:45	5,18	3,05	0,15	0,49	0,46	0,06	0,00	0,00	0,00
30.04 17:45 - 01.05 11:00	6,58	4,12	0,26	0,70	0,66	0,10	0,00	0,00	0,00
01.05 11:00 - 01.05 17:00	126,58	112,12	11,66	22,30	17,46	3,10	15,00	2,16	0,24
01.05 17:00 - 02.05 10:10	522,18	559,32	68,42	122,06	129,26	23,22	102,72	6,25	1,12
02.05 10:10 - 02.05 15:35	678,78	672,72	84,08	150,14	162,20	29,16	131,88	6,25	1,12
02.05 15:35 - 03.05 08:20	846,28	803,37	100,83	192,01	209,10	37,53	155,33	7,54	1,32
03.05 08:20 - 03.05 16:00	917,89	846,49	105,76	203,56	219,11	39,31	161,64	8,01	1,41
03.05 16:00 - 04.05 08:30	1006,99	881,14	110,38	212,80	234,13	42,01	169,56	8,55	1,48
04.05 08:30 - 04.05 15:55	1017,35	885,95	110,65	213,31	235,24	42,21	170,38	8,55	1,48
04.05 15:55 - 05.05 08:35	1090,83	898,81	112,09	215,98	240,75	43,21	174,72	8,55	1,48
05.05 08:35 - 05.05 15:40	1109,29	901,93	112,66	216,91	242,74	43,57	174,72	8,55	1,48
05.05 15:40 - 06.05 08:30	1154,65	908,48	113,48	218,50	246,27	44,21	174,72	8,55	1,48
06.05 08:30 - 06.05 15:50	1175,09	910,97	113,85	219,30	248,09	44,54	174,72	8,55	1,48
06.05 15:50 - 07.05 08:30	1198,47	914,14	114,39	220,59	251,10	45,07	174,72	8,55	1,48
07.05 08:30 - 07.05 15:55	1201,14	914,18	114,39	220,59	251,13	45,08	174,72	8,55	1,48
07.05 15:55 - 08.05 08:30	1204,62	916,17	114,42	220,64	251,17	45,08	174,72	8,55	1,48
08.05 08:30 - 09.05 08:30	1207,50	917,90	114,45	220,68	251,20	45,09	174,72	8,55	1,48
09.05 08:30 - 10.05 09:30	1209,43	917,94	114,50	220,77	251,26	45,10	174,72	8,55	1,48
10.05 09:30 - 11.05 10:00	1210,93	917,94	114,50	220,81	251,32	45,11	174,72	8,55	1,48
11.05 10:00 - 12.05 09:45	1212,23	917,94	114,50	220,83	251,36	45,12	174,72	8,55	1,48
12.05 09:45 - 14.05 09:30	1216,29	917,96	114,50	220,87	251,36	45,12	174,72	8,55	1,48
14.05 09:30 - 16.05 09:45	1218,70	917,96	114,55	220,98	251,43	45,13	174,72	8,55	1,48
16.05 09:45 - 20.05 10:10	1220,25	917,96	114,55	220,98	251,43	45,13	174,72	8,55	1,48
20.05 10:10 - 22.05 09:45	1220,32	917,96	114,55	221,05	251,51	45,14	174,72	8,55	1,48

Tab. 4: Dosisfaktoren nach Bundesgesundheitsamt Neuherberg [3, 8]

Radionuklid	Effektivdosisfaktor in Sv/Bq			
	Erwachsene		Kleinkinder bis 1 Jahr	
	Inhalation	Ingestion	Inhalation	Ingestion
Sr-89	1,1 E-08	2,5 E-09	8,0 E-08	2,5 E-08
Sr-90	3,5 E-07	3,5 E-08	1,9 E-06	1,1 E-07
Nb-95	1,6 E-09	6,9 E-10	6,8 E-08	1,4 E-08
Mo-99	1,1 E-09	1,4 E-09	7,9 E-09	1,0 E-08
Tc-99m	8,8 E-12	1,7 E-11	7,2 E-11	1,6 E-10
Ru-103	2,4 E-09	8,2 E-10	1,2 E-08	3,5 E-08
Ru-106	1,3 E-07	7,4 E-09	9,0 E-07	5,8 E-08
Ag-110m	2,2 E-08	2,9 E-09	2,1 E-07	1,2 E-08
Sb-125	3,3 E-09	7,6 E-10	2,7 E-08	4,7 E-09
Te-129m	6,5 E-09	2,9 E-09	4,7 E-08	2,3 E-08
Te-132	2,4 E-09	2,4 E-09	3,6 E-08	3,5 E-08
I-131	8,1 E-09	1,3 E-08	6,6 E-08	1,1 E-07
Cs-134	1,3 E-08	2,0 E-08	7,3 E-09	1,2 E-08
Cs-136	2,0 E-09	3,0 E-09	4,7 E-09	6,7 E-09
Cs-137	8,6 E-09	1,4 E-08	6,4 E-09	9,3 E-09
Ba-140	1,0 E-09	2,5 E-09	8,2 E-09	1,9 E-08
La-140	1,3 E-09	2,3 E-09	8,6 E-09	1,5 E-08
Ce-141	2,4 E-09	7,8 E-10	1,7 E-08	6,2 E-09
Ce-144	1,0 E-07	5,7 E-09	7,0 E-07	4,5 E-08

Einjähriges Kind	27 µSv
Erwachsener	23 µSv
"Extremfall"	31 µSv

Wie bereits erwähnt, fällt die Dosis im wesentlichen in den ersten fünf bis sechs Tagen an; im Rest des Jahres 86/87 ist die Strahlenexposition durch Inhalation bedeutungslos.

Tab. 5: Dosisbeiträge zur Inhalation

Radionuklid	Dosisbeitrag	
	Erwachsene [%]	Kleinkinder [%]
I-131	41,7	47,2
Ru-106	24,8	23,7
Te-132	9,3	19,3
Cs-137	8,0	0,8
Cs-134	6,3	0,5
Te-129m	4,8	4,8
Ru-103	2,5	1,8
Sr-90	2,2	1,6
Sr-89	0,4	0,4

3.4 Die Strahlenexposition durch Inhalation in den Folgejahren

In den Folgejahren sind nur wenige Radionuklide - entsprechend ihrer langen Halbwertszeit - nicht zerfallen. Die Radionuklide von Cäsium und Ruthen werden im Boden fest gebunden. In Mittel- und Westeuropa hat die Resuspension aus der oberen Bodenschicht keine Bedeutung. Daher ist die Strahlenexposition durch Inhalation in den Folgejahren nach 86/87 vernachlässigbar klein.

4 Die Strahlenexposition durch Ingestion

4.1 Meßwerte

Die für die Strahlenexpositionsrechnungen benutzten Meßwerte wurden im Bericht KfK-4115 publiziert. Zur Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion wurden Milch, Blattgemüse und Fleisch berücksichtigt. Für den "Extremfall" zusätzlich Obst, Beeren und Pilze.

Für Milch wurden die Daten des Bauern H., Spöck, benutzt. Die Maximalwerte betragen 60 Bq I-131/l, 30 Bq Cs-137/l und 15 Bq Cs-134/l. Das Maximum der I-131-Konzentration wurde nach zwei Tagen und das der Cs-137- bzw. Cs-134-Konzentration nach 14 Tagen erreicht. Als effektive Halbwertszeiten für den Abbau der I-131-Konzentration wurden 6 d gemessen. Die entsprechende effektive Halbwertszeit für die Cäsiumisotope beträgt 25 d.

Die Anzahl der Meßwerte für Rind-, Schweine- und Kalbfleisch ist gering. Der Mittelwert für Rindfleisch beträgt 13 Bq Cs-137/kg. Die I-131-Konzentrationen sind noch problematischer. Daher wurde entschieden, die Tatsache zu nutzen, daß der Futter-Fleisch-Transfer für Iod und Cäsium um den Faktor 3 kleiner ist als der Futter-Milch-Transfer. Es wurden daher für die Berechnungen für Kinder und Erwachsene 20 Bq I-131/kg, 10 Bq Cs-137/kg und 5 Bq Cs-134/kg angesetzt. Für Wildfleisch lagen noch weniger Meßwerte vor. Für die Dosisberechnungen wurden 180 Bq I-131/kg, 112 Bq Cs-137/kg und 66 Bq Cs-134/kg entsprechend den Meßwerte von Rehfleisch aus Mörsch angesetzt. Für die effektiven Halbwertszeiten in Fleisch wurden die gleichen Werte wie für Milch angesetzt.

In Salat wurden 200 Bq I-131/kg, 50 Bq Cs-137/kg und 25 Bq Cs-134/kg gefunden. In Spinat waren es 1500 Bq I-131/kg, 140 Bq Cs-137/kg und 70 Bq Cs-134/kg. Als Mittelwert dieser Ergebnisse wurden 850 Bq I-131/kg Gemüse, 95 Bq Cs-137/kg Gemüse und 47,5 Bq Cs-134/kg als Basis für die Dosisberechnungen angesetzt. Die effektiven Halbwertszeiten von I-131 und Radiocäsium auf Gemüse wurden mit 6 d und 25 d angesetzt.

Für Pilze wurden bis Ende Oktober 1986 als Mittelwert 60 Bq Cs-137/kg und 30 Bq Cs-134/kg gemessen. Als grobe Mittelwerte für heimische Beeren und Obst wurden 30 Bq Cs-137/kg und 15 Bq Cs-134/kg angesetzt.

Neben den Radionukliden I-131, Cs-137 und Cs-134 sind die anderen Radionuklide entweder von untergeordneter Bedeutung, weil ihre Konzentration in der Umwelt zu niedrig war oder weil ihr Transfer in die Nahrungsmittel vernachlässigbar klein ist.

4.2 Voraussetzungen für die Berechnung des Strahlenexposition durch Ingestion

Die Effektivdosisfaktoren für Ingestion wurden aus Tab. 4 entnommen. Bei der Dosisberechnung wurde ein linearer Anstieg der I-131-Konzentration in Milch, Fleisch und Gemüse über zwei Tage und für Radiocäsium über 14 Tage angesetzt. Danach wurde für die verzehrten Nahrungsmittel eine exponentielle Abnahme mit den effektiven Halbwertszeiten von 6 Tagen für I-131 und von 25 Tagen für Radiocäsium angesetzt. Da ab Mitte November 1986 die Verfütterung der im Frühling kontaminierten und geernteten Futtermittel beginnen wird, wurde für Radiocäsium ein zweiter gleichartiger Konzentrationsaufbau und -abbau beginnend mit 15. November 1986 angenommen, wie er in der Milch im Frühling beobachtet wurde. Auch für Fleisch wurde "ein zweiter Peak" berücksichtigt.

Für Pilze und Obst plus Beeren wurden konstante Konzentrationen für Radiocäsium angesetzt. Sie entsprechen den Mittelwerten, die bisher für diese Produkte gemessen wurden.

In Tab. 6 sind die Nahrungsmittelmengen angeführt, welche von einem einjährigen Kind, dem männlichen Erwachsenen und vom "Extremfall" verzehrt werden. Die Werte für den Erwachsenen wurden aus dem Ernährungsbericht [5] entnommen.

Für den "Extremfall" wurden zusätzlich der wöchentliche Verzehr von 0,5 kg Pilzen und ein Jahresverzehr von Beeren und Obst von 32 kg angenommen. Die 32 kg sind die Summe aller Beeren und heimischen Obstarten, die im Ernährungsbericht angegeben werden. Außerdem sind einbezogen Marmeladen, tiefgekühltes und getrocknetes Obst.

Tab. 6: Verzehrraten, die bei den Dosisberechnungen zur Ingestionsdosis angesetzt wurden

Nahrungsmittel	Verzehrrate in kg/a		
	einjähriges Kind	männlicher Erwachsener	"Extremfall"
Milch	300	102	102
Fleisch	0	75	75
Blattgemüse	0	15	15
Obst, Beeren	0	0	32
Pilze	0	0	26

4.3 Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion für 86/87

In Tab. 7 werden die insgesamt aufgenommenen Aktivitäten von I-131, Cs-137 und Cs-134 durch die beschriebenen Nahrungsmittel angegeben.

Tab. 7: Ingestion von I-131, Cs-137 und Cs-134 mit Milch, Fleisch, Pilzen, Beeren und Obst 86/87

	Aufgenommene Aktivität in Bq		
	I-131	Cs-137	Cs-134
Einjähriges Kind			
Milch	478	2111	1056
Fleisch	-	-	-
Blattgemüse	-	-	-
Summe	478	2111	1056
Männlicher Erwachsener			
Milch	163	718	359
Fleisch	40	176	88
Blattgemüse	340	145	73
Summe	543	1039	520
"Extremfall"			
Milch	163	718	359
Fleisch	360	1971	986
Blattgemüse	340	145	73
Pilze	-	1560	780
Obst, Beeren	-	960	480
Summe	863	5354	2678

Die in Kindern tatsächlich gemessenen Radiocäsiumwerte sind wesentlich niedriger als in Tab. 7 angegeben. Dies spricht für eine wesentliche Überschätzung der angenommenen kontaminierten Milchmenge.

Die Effektivdosisexposition durch Ingestion der beschriebenen Nahrungsmittel wird in Tab. 8 wiedergegeben.

Tab. 8: Effektivdosisexposition durch Ingestion von Milch, Fleisch, Blattgemüse, Pilzen, Beeren und Obst für 86/87

Nuklid	Effektivdosis in μSv
Einjähriges Kind	
I-131	53
Cs-137	20
Cs-134	13
Summe	86
Männlicher Erwachsener	
I-131	7
Cs-137	15
Cs-134	10
Summe	32
"Extremfall"	
I-131	11
Cs-137	75
Cs-134	54
Summe	140

4.4 Die Strahlenexposition durch Ingestion in den Folgejahren

Die Strahlenexposition in den Folgejahren bedingt durch Ingestion von Radiocäsium ist von untergeordneter Bedeutung. Die 5 000 Bq Cs-137/m², verursacht durch den Kernwaffenfallout um 1960 und danach, führen grob gesprochen zu einer Strahlenexposition von 10 $\mu\text{Sv/a}$ [6, 7]. Durch den Reaktorunfall von Tschernobyl wurden im Raum Karlsruhe 1520 Bq Cs-137/m² und 760 Bq Cs-134/m² abgelagert. Berücksichtigt man die leicht abweichenden Ingestionsdosisfaktoren für Effektivdosen der beiden Radiocäsiumisotope und setzt die

Ablagerungswerte in Relation zu den 5000 Bq Cs-137/m², verursacht durch den Kernwaffenfallout, so wird in den ersten Jahren nach 86/87 durch Ingestion eine Dosis von 5 µSv/a im Raum Karlsruhe zu erwarten sein. In den Folgejahren wird Cs-134 rasch und Cs-137 entsprechend seiner langen Halbwertszeit von 30,17 Jahren langsam an Bedeutung abnehmen.

5 Die Gesamtexposition

In Tab. 9 wird die gesamte Effektivdosis im ersten Jahr nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl im Raum Karlsruhe wiedergegeben. Die Effektivdosen liegen für den männlichen Erwachsenen bei 60 $\mu\text{Sv/a}$, für ein einjähriges Kind bei 118 $\mu\text{Sv/a}$ und für den "Extremfall" bei 337 $\mu\text{Sv/a}$.

Tab. 9: Gesamte Effektivdosen im ersten Jahr nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl im Raum Karlsruhe

Art der Dosis- exposition	Effektivdosis in μSv		
	Einjähriges Kind	Männlicher Erwachsener	"Extremfall"
Extern	5	5	166
Inhalation	27	23	31
Ingestion	86	32	140
Summe	118	60	337

In diesem Bericht wurde versucht, weitgehend realistische Strahlenexpositionen zu berechnen. Trotz der nennenswerten Streuung im Einzelverhalten der Menschen und den entsprechend starken Abweichungen der Strahlenexposition durch einzelne Komponenten der Gesamtstrahlenexposition, führt offensichtlich auch extremes Verhalten zu keiner grundsätzlich anderen Strahlenexposition als sie für Erwachsene oder Kinder zu erwarten ist.

Der als "Extremfall" der Strahlenexposition bezeichnete Mensch weist mit seinem ganzjährigen Leben im Wald, seiner starker körperlicher Tätigkeit entsprechenden Atemrate und dem Verzehr von Wildfleisch, Blattgemüse, Pilzen, Beeren und Milch am ehesten die Lebensgewohnheiten jener letzten Jäger der Altsteinzeit auf, die bereits mit neusteinzeitlichen Errungenschaften der Tierhaltung vertraut waren. Diese Lebensform ist in der Bundesrepublik Deutschland nicht mehr üblich und nicht mehr möglich. Diese Lebensweise würde ein enorm hohes Risiko für Leib und Leben bedeuten, das in keinem Vergleich mit der Gefährdung durch erhöhte Dosen ionisierender Strahlung steht.

Karlsruhe kann durchaus als repräsentativ für die Bundesrepublik Deutschland angesehen werden. Lediglich in Südbayern und im südlichen Baden-Württemberg wurden durch starke Regenfälle während des Durchzuges der Wolke von Tschernobyl wesentlich höhere Aktivitäten abgelagert. Folge davon waren höhere externe Strahlenexposition, höhere Inhalationsdosen und nennenswerte höhere Ingestionsdosen. Sinnvolle Zahlen für die Umrechnung der hier angegebenen Dosiswerte auf extreme Bereiche in der Bundesrepublik Deutschland dürften der Faktor 10 für die externe Strahlenexposition, der Faktor 2 für die Strahlenexposition durch Inhalation und der Faktor 2 - 5 für die Strahlenexposition durch Ingestion sein.

6 Literatur

- [1] L.A König, H. Schüttelkopf, S. Erat, H. Fessler, S. Hempelmann, K. Maurer, M. Pimpl, A. Radziwill: Der Reaktorunfall von Tschernobyl. Meßergebnisse des Kernforschungszentrums Karlsruhe. KfK 4115, August 1986
- [2] H. D. Brenk: γ -Dosisfaktoren für ca. 800 Radionuklide zur Berechnung der externen Strahlenexposition durch Photonen und Elektronenstrahlen BSU-7904/1. Aachen: Brenk Systemplanung, Neuherberg: Bundesgesundheitsamt 1983
- [3] D. Noßke, G. Berich, S. Langner: Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen (Erwachsene) ISH-Heft 63, Neuherberg: Bundesgesundheitsamt 1986
- [4] Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publikation No. 23, Pergamon Press, Oxford, 1975, pp. 346, 347
- [5] Ernährungsbericht 1976, Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V., Frankfurt/Main, 1976
- [6] UNSCEAR 1977, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, United Nations, New York
- [7] UNSCEAR 1982, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, United Nations, New York
- [8] K. Henrichs, U. Elsasser, C. Schotola, A. Kaul: Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen (Altersklasse 1 Jahr). ISH-Heft 78, Neuherberg: Bundesgesundheitsamt 1985